

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Асинхронный электропривод транспортера этикетировочной машины
УДК 62-83-523:621.798.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Касымов Тохир Шавкатович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Куликова О. А.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А.Г.	Д.Т.Н.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ71	Касымову Тохиру Шавкатовичу

Тема работы:

Асинхронный электропривод транспортера этикетировочной машины

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2019

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<p>Объект исследования: транспортер этикетировочной машины, номинальная скорость работы – 30м/мин, погрешность поддержания заданной скорости не более 10% на нижней рабочей скорости, режим работы – продолжительный, нагрузка реактивная. Требуется обеспечить синхронное движение основного и прижимного транспортера.</p>
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор литературных источников и технической документации; Описание технологического процесса; Описание этикетировочного аппарата; Выбор электрического оборудования; Разработка и оптимизация системы управления; Разработка имитационной модели системы автоматического управления; Рассмотрение вопросов технико-экономического обоснования НИР; Рассмотрение вопросов социальной ответственности.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Подопригора И.В., доцент, к.э.н.
«Социальная ответственность»	Куликова О. А., доцент, к.т.н.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1. Описание технологического процесса	
2. Выбор электрического оборудования и расчет параметров	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Касымов Т.Ш.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ71	Касымову Тохиру Шавкатовичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Асинхронный электропривод транспортера этикетировочной машины	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
6. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: асинхронный электропривод с векторным управлением</p> <p>Методика: разработка, исследование</p> <p>Рабочая зона: закрытое помещение (цех)</p> <p>Область применения: линия по разливу в стеклотару</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования; ГОСТ 21958-76. Система «человек-машина». Зал и кабины операторов. Взаимное расположение рабочих мест. Общие эргономические требования; Трудовой кодекс российской федерации.
6.2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– повышенный уровень вибрации на рабочем месте – недостаточная освещенность – повышенная температура воздуха рабочей зоны – поражение электрическим током
6.3. Экологическая безопасность:	Защита окружающей среды возлагается на производство, при дальнейшем внедрение и применение данного метода.
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Наиболее вероятной ЧС при разработке и проверке асинхронного электро-привода является пожар

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Куликова О.А.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
--------	-----	---------	------

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Профиль – Электропривод и системы управления электроприводом

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 110 страниц машинописного текста, 47 рисунка, 34 таблиц и 23 источников.

Ключевые слова: этикетировочная машина, асинхронный частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, система автоматического управления, статические и динамические характеристики, показатели качества регулирования.

Объектом исследования является система автоматического управления этикетировочной машины. Цель работы – разработка и исследование электроприводов основного и прижимного транспортёров.

В выпускной квалификационной работе произведён расчет и выбор приводного двигателя преобразователя частоты и контроллера для управления электроприводами. Обоснован выбор способа управления, рассчитаны механические и электромеханические характеристики. Выполнена оптимизация контуров регулирования и определены параметры настройки регуляторов. Методом имитационного моделирования на ЭВМ исследованы переходные процессы в основных режимах работы. Предложен способ синхронизации скоростей и положений механизмов.

В разделе экономики произведен расчет сметы затрат на пусконаладочные работы, по установке новых электроприводов этикетировочной машины.

В разделе безопасность и жизнедеятельность труда рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности. Проанализированы опасные и вредные факторы производства.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word, в работе использованы программы Matlab, MathCAD, Microsoft Paint, Microsoft Power Point, Microsoft Visio.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	7
1. Описание технологического процесса	9
1.1. Технологический процесс.....	9
1.2. Описание этикетировочной машины.....	10
1.3. Принципиальная схема этикетировочной машины	12
1.4 Кинематика электроприводов этикетировочной машины	14
2. Выбор электрического оборудования и расчёт параметров.....	16
2.1 Определение подходящего типа электропривода	16
2.2 Выбор электрических двигателей	19
2.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным	20
2.4. Расчет и построение естественной механической.....	25
и электромеханических характеристик электродвигателя	25
2.5. Расчетная схема замещения механической системы	27
2.6. Выбор преобразователя частоты и управляющего контроллера	28
3. Оптимизация линеаризованной САУ СЭП.....	33
3.1. Математическая модель асинхронного двигателя	33
3.2. Разработка системы управления	36
3.3. Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода	42
3.3.1. Оптимизация контура тока	42
3.3.2. Оптимизация контура потокосцепления.....	45
3.3.3. Оптимизация САР скорости	49
3.3.4. Оптимизация контура положения.....	52
4. Исследование нелинейной САУ РЭП.....	55
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	59
5.1. Техничко-экономическое обоснование НИР	60
5.2. Планирование работ по научно-техническому исследованию	62
5.2.1 Определение трудоемкости этапов НИР	63
5.2.2 Техническая готовность темы	65
5.2.3 Построение графика работ	66
5.3 Смета затрат на разработку проекта.....	67
5.4 Оценка целесообразности исследования.....	71
5.4.1 Оценка научно-технического уровня исследования	71
5.4.2 Оценка возможных рисков	73
6. Социальная ответственность.....	76
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	76
6.1.1. Специальные трудовые нормы трудового законодательства	76
6.2 Производственная безопасность	78
6.2.1 Анализ вредных и опасных факторов	78
6.2.2 Расчёт заземления.....	82
6.3 Экологическая безопасность	85
6.4 Пожарная безопасность	88
Заключение.....	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	93
Список опубликованных работ по теме диссертации.....	95
Приложение А.....	96

ВВЕДЕНИЕ

Разработка производительных, эргономичных и экономичных систем электропривода является одним из приоритетных векторов развития современной техники. Поскольку автоматизация производства и энергосбережение привлекают все больше внимания, а, следовательно, и инвестиций, количество приводов, которые способны удовлетворить современным трендам, продолжает расти. Расширение использования информационных технологий (персональные компьютеры, системы цифрового управления) и систем связи не только привело к созданию новых областей применения приводов, но и усилило требования к использованию современных областях промышленности.

Анализ продукции ведущих мировых производителей систем электроприводов и материалов опубликованных научных исследований в этой сфере позволяет выделить следующие ярко выраженные направления развития электропривода: постепенно снижается доля систем привода с двигателями постоянного тока и увеличивается доля систем привода с двигателями переменного тока. Это связано как с низкой надежностью механического коллектора, так и со стремлением отказаться от использования редкоземельным металлов, производство которых в большинстве своем находится за границей, по большей части в Китае. Исходя из этого, а также вследствие резкого удешевления преобразователей частоты процент использования частотно-регулируемых асинхронных электроприводов быстро увеличивается.

Перспективные системы управления электроприводами разрабатываются с ориентацией на совокупную автоматизацию технологических процессов и согласованную работу нескольких приводов в составе промышленной сети. Задача синхронизации скоростей и положений механизмов, задействованных в технологическом процессе, является актуальной для многих отраслей промышленности, таких как

машиностроение, металлообработка, текстильная, пищевая и другие. Согласованное управление позволяет объединить отдельные электроприводы в общую систему управления технологическим процессом, обеспечить необходимое качество продукции, снизить до минимальных значений случаи брака и исключить простои оборудования.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка и исследование электроприводов транспортеров этикетировочной машины линии по производству бутилированной продукции.

1. Описание технологического процесса

Производство представляет собой конвейерную линию по изготовлению бутилированной продукции. Каждый элемент конвейерной линии представляет сложный многодвигательный агрегат.

1.1. Технологический процесс

Схема технологического процесса представлена на рисунке 1.1.

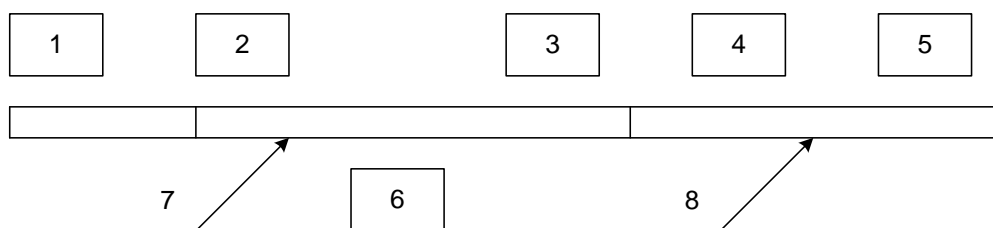


Рисунок 1.1 – Схема технологического процесса

Принятые обозначения:

1–Элеватор

2–Ополаскиватель

3–Моноблок (разлив-укупорка)

4–Машина визуальной инспекции жидкости

5–Этикетировочная машина

6–Фильтр

7-8–Транспортёр (конвейер)

По элеватору 1 поднимается пустая тара, прошедшая первичную очистку, попадая в ополаскиватель 2, проходит окончательную очистку, находясь определённое время под напором чистящей смеси. Очищенная тара попадает в моноблок 3, где производится разлив продукта и укупорка тары,

то есть пустая тара наполняется продуктом и закупоривается крышкой, после чего попадает в машину визуальной инспекции жидкости 4, где ведётся контроль посторонних включений. Укупоренная тара направляется в этикетировочную машину 5, там производится оклейка тары этикеткой и контрэтикеткой. От фильтра 6 зависит чистота продукта.

1.2. Описание этикетировочной машины

В состав конвейерной линии входит этикетировочная машина с двойным транспортером. Внешний вид этикетировочной машины представлен на рисунке 1.2.

Технические характеристики:

1. Максимальная производительность – до 600 этикеток в минуту.
2. Максимальная скорость движения конвейера – 30 м/мин.
3. Максимальная высота этикетки (включая подложку) – 160 мм.
4. Максимальная высота контр этикетки (включая подложку) – 100 мм
5. Максимальная длина этикетки, контр этикетки – 999 мм.
6. Максимальный диаметр роля – 300 мм.
7. Диаметр втулки – 38.1, 76.2, 104 мм.
8. $\sum W_i = 550 \text{ Н}$ – тяговое усилие, равное общему сопротивлению движения ленты
9. Точность наклейки этикетки – ± 1 мм.
10. Напряжение питания – 3 фазы 380 В.
11. Потребляемая мощность – 1.5 кВт.
12. Масса – 160 кг.
13. Длина – 2100 мм.
14. Ширина – 1800 мм.
15. Высота (до уровня конвейера) – 900 мм.

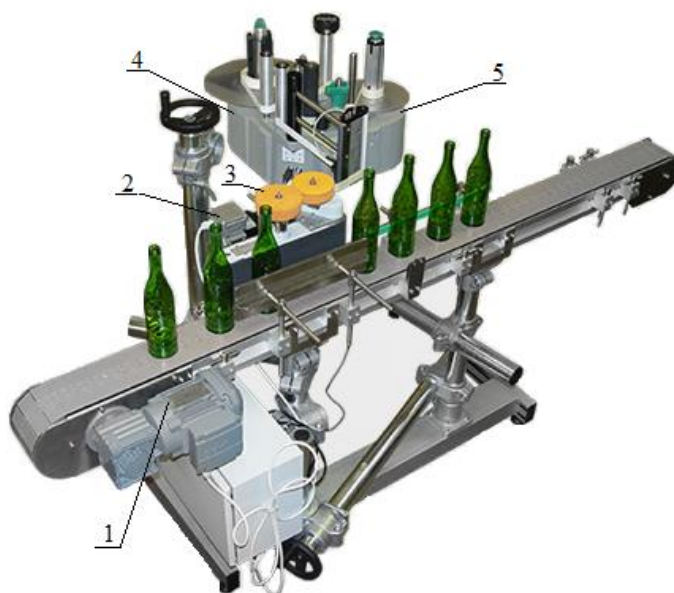


Рис. 1.2 Этикетировочная машина

В состав этикетировочной машины входят 5 электроприводов: электропривод основного транспортёра – 1, электропривод прижимного (верхнего) транспортёра – 2, электропривод ориентатора (боковых валиков) – 3, два электропривода подачи этикетки (этикетки и контрэтикетки) – 4 и 5.

На этикетировочной машине установлен датчик положения на входе для определения момента выдачи этикетки. Система автоматически рассчитывает время выдачи этикетки, причём аппликаторы этикетки и контрэтикетки работают согласованно (синхронно).

Электроприводы прижимного (верхнего) транспортёра и ориентатора (боковых валиков) являются бездатчиковыми, что требует периодической подстройки их скоростей движения.

1.3. Принципиальная схема этикетировочной машины

Принципиальная схема этикетировочного аппарата изображена на рисунке 1.3 [1].

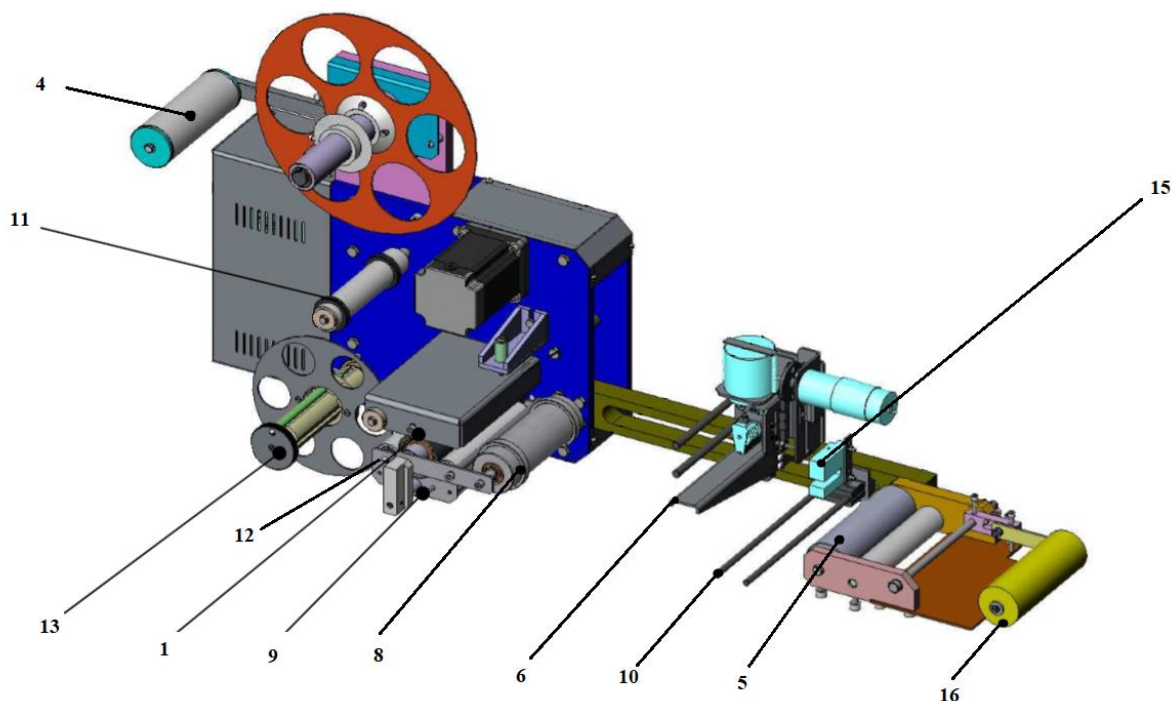


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема этикетировочной машины

Аппликатор выпускается в правостороннем и левостороннем исполнении, что связано с направлением подачи продукта. Далее описывается работа правосторонней машины. Для левосторонней – все объяснения зеркальны.

Этикеточный материал разматывается с ролика 3. Материал катушки удерживается двумя съёмными пластинами 2. Передняя съёмная пластина должна быть прижата к этикеточной катушке.

Плавающий рычаг 4 контролирует торможение размотки. Это приспособление предотвращает неконтролируемый инерционный ход этикетировочного материала. Тормоз не должен быть затянут очень туго, иначе мотор может остановиться или рулон материала – порваться.

Рычаг 11 держит материал в натяжении и уменьшает ускорение. Направляющий ролик 8 обеспечивает правильный ход материала. Материал направляется к отделяющей кромке через направляющий ролик 9.

Щётка 6 удерживает материал в натяжении, не нарушая движение. На отделяющей кромке 10 расположен датчик этикетки 15. Датчик этикетки определяет интервалы между этикетками. Датчик этикетки имеет источник и приёмник света. Чувствительность может быть настроена с помощью панели управления.

На кромке отделения 10 этикетка отделяется от бумажной подложки. С помощью ролика 16 этикетка наносится на продукт.

Ролики 5 обеспечивают правильное прохождение материала вокруг отделяющей кромки. Ведущий ролик 1 поддерживает скорость транспортировки материала в соответствии с настройкой.

Ролик прижима 12 должен быть настроен по центру ленты для надёжного прогона материала. Необходимую позицию можно настроить с помощью винтов.

С помощью ручки можно открыть и закрыть механический прижим ролика прижима 12. При заправке материала прижимной ролик должен быть открыт

Отделение возможно только когда ручка прижима находится в закрытом положении. Через направляющий ролик бумага подложки передаётся к сердечнику намотки 13. Конус между четырьмя иглами может быть выдвинут, чтобы позволить заправить бумагу подложки.

За исключением ведущего ролика 1 и щётки 6 аппликатор не имеет изнашивающихся частей.

1.4 Кинематика электроприводов этикетировочной машины

Кинематические схемы электроприводов основного, прижимного (верхнего) транспортёров и ориентатора, приведены соответственно на рисунках 1.4 – 1.6.

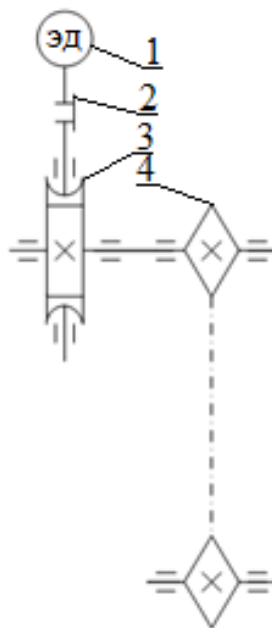


Рисунок 1.4 – Кинематическая схема основного транспортёра

Кинематическая схема основного транспортёра имеет электродвигатель – 1, муфту – 2, червячный редуктор – 3 с передаточным числом $i=30$ и цепную передачу – 4.

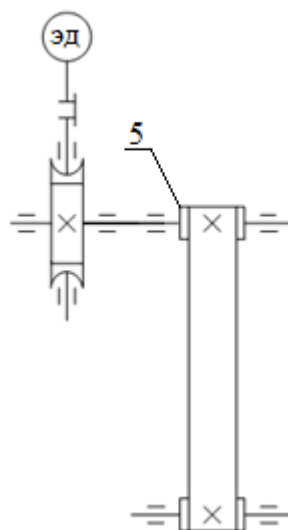


Рисунок 1.5 – Кинематическая схема прижимного (верхнего) транспортёра

Кинематическая схема прижимного (верхнего) транспортёра имеет электродвигатель, муфту, червячный редуктор с передаточным числом $i=50$ и ремённую передачу – 5.

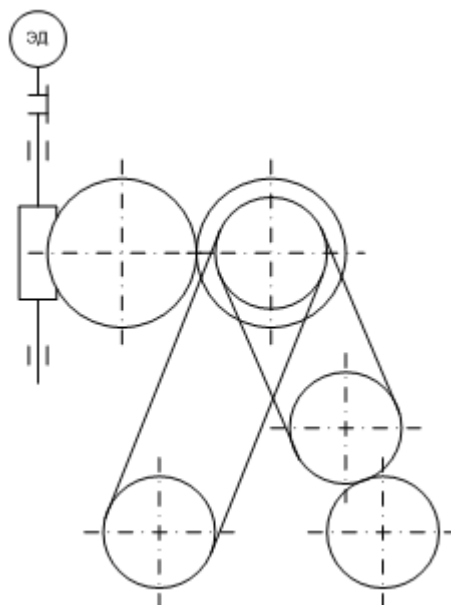


Рисунок 1.6 – Кинематическая схема ориентаторов (боковых валиков)

Кинематическая схема ориентаторов (боковых валиков) имеет электродвигатель, муфту, червячный редуктор с передаточным числом $i=50$ и планетарную передачу.

На рисунке 1.7 представлена функциональная схема, включающая в себя узлы основного и прижимного транспортера, приводящиеся в движение посредством двигателей. Также представлен узел электропривода боковых валиков. Для точного срабатывания этого узла установлен датчик продукта, сигнал с которого поступает в контроллер. В данном случае контроллер обеспечивает согласованную работу всех компонентов многодвигательного электропривода.

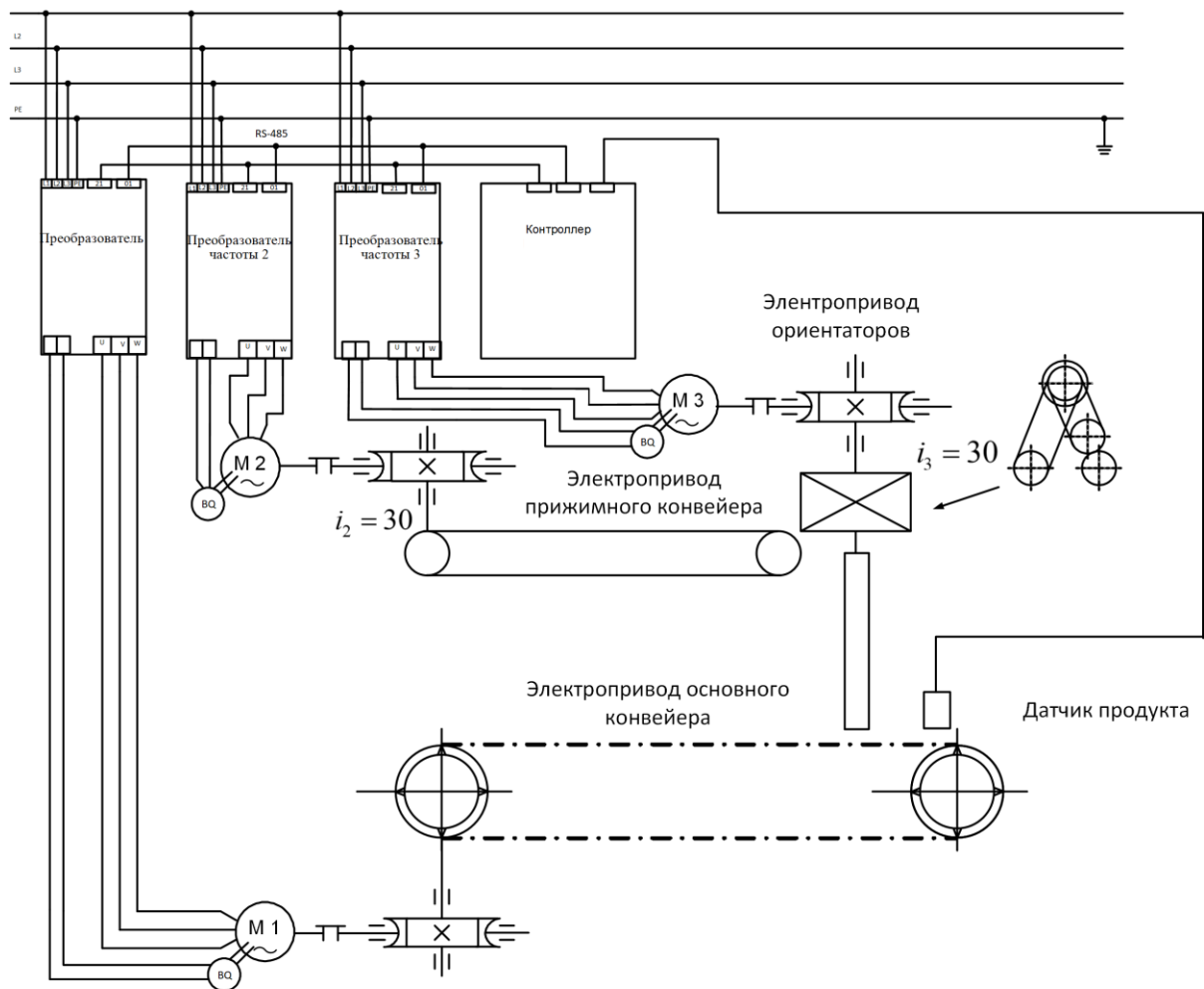


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема многодвигательного электропривода

Для точного срабатывания этого узла установлен датчик продукта, сигнал с которого поступает в контроллер. В данном случае контроллер обеспечивает согласованную работу всех компонентов многодвигательного электропривода.

2. Выбор электрического оборудования и расчёт параметров

2.1 Определение подходящего типа электропривода

Выбор системы электропривода является одним из основополагающих этапов процесса проектирования, так как от этого будет зависеть технико-экономический успех. Поэтому необходимо проанализировать различные системы электропривода и выбрать ту, которая

в большей степени будет удовлетворять технологическим и экономическим требованиям, предъявленным к электроприводу.

Режим работы является длительным, не предусматривающим частых пусков и остановок. Нагрузка является постоянной, статический момент не зависит от скорости.

Исходя из поставленных задач и условий эксплуатации, более всего подходят асинхронные электроприводы с частотным регулированием, которые по функциональным возможностям и эксплуатационным характеристикам отвечают обозначенным требованиям. Однако, при окончательном выборе типа электропривода, необходимо учитывать затраты, а также соизмерить их с достигаемым при этом эффектом.

Основные экономические предпосылки использования асинхронного электропривода [2].

Снижение эксплуатационных расходов

Одним из ключевых преимуществ системы асинхронного электропривода с частотным управлением является значительное снижение затрат на техническое обслуживание по сравнению с приводами постоянного тока (как ближайшей альтернативой). Основными компонентами двигателей постоянного тока, требующими технического обслуживания, являются щеточно-коллекторный узел и якорь, который подвержены центробежной силе. Эти компоненты требуют частого планового технического обслуживания и, в конечном счете, восстановления или замены после определенного износа. Затраты, связанные с обслуживанием и возможной заменой, могут быть очень высокими, особенно при наличии нескольких двигателей. При этом даже не учитывается, что произойдет, если двигатель постоянного тока или привод выйдет из строя. Для устранения неисправностей требуется технический специалист, а приводы и двигатели постоянного тока, как известно, трудно поддаются диагностике. Двигатели асинхронных двигателей имеют меньше компонентов и требуют меньшего объема технического обслуживания. Привод переменного тока защищает

двигатель, отслеживая наличие проблем и исправляя их, если это возможно. В некоторых случаях, если привод не может исправить ситуацию, он отключает систему во избежание серьезного повреждения. В любом случае диагностика выполняется для точного выявления ошибки, что позволяет как можно быстрее исправить ситуацию.

Степень защиты.

Электродвигатели, используемые на производстве бутилированной воды, как правило, подвержены воздействию следующих факторов:

- Образование конденсата на металлических деталях
- Повышенная влажность
- Пыль

Несмотря на то, что на производстве проводятся мероприятия по борьбе с пылеобразованием пыль может попасть в помещение, рециркулироваться и попадать в двигатели. В связи с этим необходима возможность подобрать подходящий класс пылевлагозащиты. Исполнения асинхронных машин имеют широкий ряд степеней защиты.

Все вышеизложенное можно отнести к преимуществам асинхронного двигателя, но для достоверности выбора также необходимо учитывать то, что двигатель будет работать совместно с преобразователем частоты. Если не учитывать некоторые особенности работы такого привода, этот привод будет использоваться нерационально, а в крайних случаях может вовсе не удовлетворить поставленным задачам.

Выбор электропривода с частотным управлением в рамках поставленного технического задания имеет ряд особенностей, связанных с необходимостью синхронного управления несколькими электроприводами. Поэтому, несмотря на то, что диапазон регулирования скорости сравнительно невелик, необходимо использовать замкнутые системы регулирования, основанные на принципах векторного управления.

Немаловажным обстоятельством, свидетельствующим в пользу частотно-регулируемого электропривода, является и то, что современные

преобразователи частоты легко интегрируются в любые системы управления, как низовой интеллектуальный элемент автоматики, не требуют сложных согласующих схем и обладают отличным набором встроенных сервисных возможностей (контроль за током и скоростью приводного двигателя, развитая система защит и т.д.).

2.2 Выбор электрических двигателей

В соответствии с ГОСТ 22644-77 выбрана скорость транспортера, равная 30 м/мин. По методике, описанной в [3], определяем статическую мощности привода для выбора электродвигателя.

$$N_{эд} \geq \frac{K_3 \cdot \sum W_i \cdot V_L}{10^3 \cdot \eta_M} = \frac{1,1 \cdot 550 \cdot 0,5}{10^3 \cdot 0,9} = 0,336 \text{ кВт},$$

где K_3 – коэффициент запаса сцепления ленты с барабаном;

$\sum W_i$ – тяговое усилие, равное общему сопротивлению движения ленты, Н;

V_L – скорость движения ленты, м/с;

η_M – КПД приводного механизма.

Статический вращающий момент, приведенный к валу электродвигателя:

$$M_{CT} = \frac{F \cdot D_6}{2 \cdot 10^3 \cdot U_{np} \cdot \eta_M} = \frac{750 \cdot 200}{2 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 0,98} = 2,551 \text{ Н}$$

где F – натяжение ленты, Н;

D_6 – диаметр приводного барабана, мм;

U_{np} – передаточное отношение привода;

η_M – КПД привода

Определим скорость вращения приводного барабана:

$$n = \frac{1000 \cdot V_L}{\pi \cdot D_6} = \frac{1000 \cdot 30}{3,14 \cdot 200} = 47,7 \text{ об / мин}$$

С учетом передаточного отношения скорость вращения вала двигателя:

$$n_d = n \cdot U_{np} = 47,7 \cdot 30 = 1431 \text{ об / мин}$$

Для основного транспортера выбираем электродвигатель АИР 63В4У3, паспортные данные которого приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические данные двигателя АИР 63В4У3

Типоразмер двигателя	Синхронная частота вращения, об/мин	Момент инерции, кг*м ²	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			
				Скольжение	Ток, А	КПД, %	cos φ
АИР 63В4У3	1500	0,0014	0,37	0,12	2,05	68	0,7

Продолжение таблицы 2.1

$\frac{M_{\Pi}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{\max}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{\min}}{M_{НОМ}}$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{НОМ}}$
2,1	2,2	1,6	6,5

Для прижимного (верхнего) транспортера выбираем электродвигатель АИР 63–А, паспортные данные которого приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – технические данные двигателя АИР 63–А

Типоразмер двигателя	Синхронная частота вращения, об/мин	Мощность, кВт
АИР 63–А	3000	0,37

В дальнейшем будет рассмотрен основной транспортёр, поскольку для верхнего транспортёра всё будет идентично.

2.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя воспользуемся его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, показанная на рисунке 2.1.

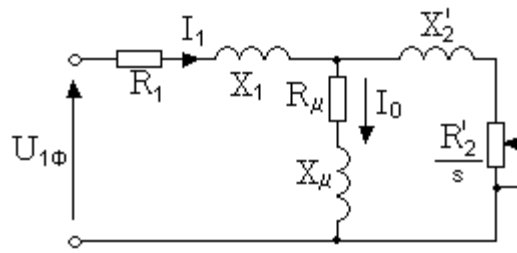


Рисунок 2.1 - Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\overline{U_{1\phi}} - \overline{E_1} - j \cdot X_1 \cdot \overline{I_1} = 0;$$

$$\overline{E_1} + j \cdot X_2' \cdot \overline{I_2'} + R_2' \cdot \overline{I_2'} / s = 0;$$

$$\overline{I_1} + \overline{I_2'} - \overline{I_0} = 0.$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих системе основных уравнений асинхронного двигателя, изображена на рисунке 2.2.

Определим параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя АИР63В4У3 по его каталожным данным (таблица 2.1) в соответствии с методикой, изложенной в [4]. Расчеты выполним при следующих основных допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе составляют $0,02 P_n$;
- активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т.е. эффекты вытеснения не учитываются.

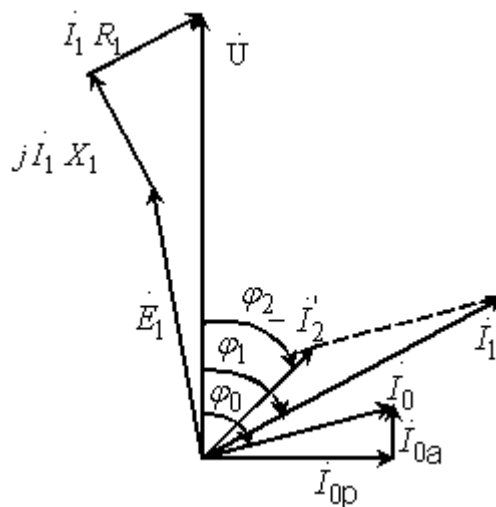


Рисунок 2.2 - Векторная диаграмма асинхронной машины

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1n} (1 - s_n) / (1 - p_* s_n)]^2}{1 - [p_* (1 - s_n) / (1 - p_* s_n)]^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,799^2 - [0,75 \cdot 2,04 \cdot (1 - 0,12) / (1 - 0,75 \cdot 0,12)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 0,12) / (1 - 0,75 \cdot 0,12)]^2}} = 0,86 \text{ A},$$

где

$$I_{1n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{370}{3 \cdot 220 \cdot 0,7 \cdot 0,68} = 1,177 \text{ A}$$

– номинальный ток статора двигателя;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 370}{3 \cdot 220 \cdot 0,595 \cdot 0,68} = 1,039 \text{ A}$$

– ток статора двигателя при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{p_*}$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

η_{p_*} – КПД при частичной нагрузке;

$p_* = P / P_n$ – коэффициент загрузки двигателя.

Данные о коэффициенте мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе отсутствуют. Определим эти параметры, руководствуясь следующими соображениями [5]:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10-15% меньшей номинальной, т.к. большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке $p_* = 0,75$ практически равны между собой, т.е. $\eta_n \approx \eta_{0,75} = 0,68$.

- коэффициент мощности при той же нагрузке $p_* = 0,75$ значительно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя. Согласно зависимости, приведенной на рисунке 2.3, $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_n = 0,85$, тогда $\cos \varphi_{p_*} = 0,85 \cdot \cos \varphi_n = 0,85 \cdot 0,7 = 0,595$.

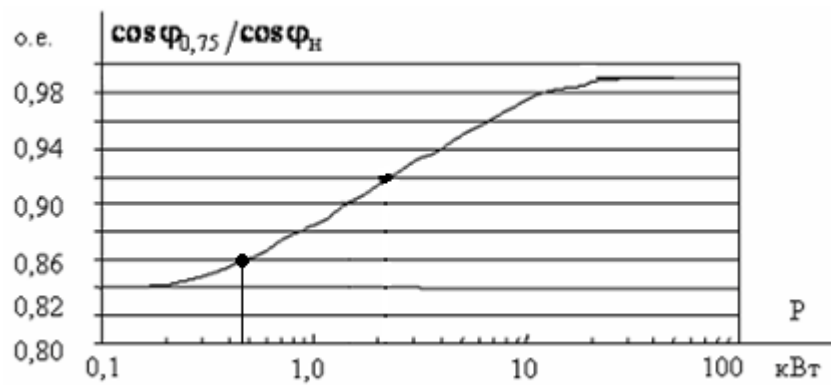


Рисунок 2.3- Зависимость
от мощности асинхронного двигателя

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_k) \cdot C_1} = \frac{73,154}{(1 + 1/0,723) \cdot 1,073} = 28,612 \text{ Ом},$$

где β – коэффициент, значение которого находится в диапазоне 0,6 – 2,5, принимаем $\beta = 1$;

$$C_1 = 1 + (I_0 / (2 \cdot k_i \cdot I_{\text{н}})) = 1 + (1,487 / (2 \cdot 5 \cdot 2,04)) = 1,073 ;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{\text{лн}}^2 \cdot (1 - s_{\text{н}})}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{макс}} \cdot P_{\text{н}}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,12)}{2 \cdot 1,073 \cdot 2,2 \cdot 370} = 73,154$$

– расчетные коэффициенты;

$$s_k = s_{\text{н}} \frac{k_{\text{макс}} + \sqrt{(k_{\text{макс}})^2 - [1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{макс}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{макс}} - 1)} =$$

$$= 0,03 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,12 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,12 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,723$$

– критическое скольжение.

Активное сопротивление статорной обмотки

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,073 \cdot 28,612 \cdot 1 = 30,697 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 0,955 \cdot 1,073 \cdot 28,612 = 29,33 \text{ Ом},$$

где $\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0,723^2) - 1} = 0,955$.

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной обмотке,

$$X_{2\text{н}}' = 0,58 \cdot X_{\text{кн}} / C_1 = 0,58 \cdot 29,33 / 1,073 = 15,855 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 29,33 = 12,318 \text{ Ом.}$$

По найденным значениям C_1 , R_2' , R_l и X_k определим критическое скольжение

$$s_k = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\pm \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,073 \cdot 28,612}{\pm \sqrt{30,697^2 + 29,33^2}} = \pm 0,723.$$

Данное значение критического скольжения совпадает с рассчитанным выше.

Согласно векторной диаграмме (рисунок 2.3) э.д.с. ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_1 = \sqrt{(U_{1j} \cos \varphi_{1н} - R_l I_{1н})^2 + (U_{1j} \sin \varphi_{1н} + X_l I_{1н})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,7 - 30,697 \cdot 2,04)^2 + (220 \cdot 0,714 + 12,318 \cdot 2,04)^2} = 160,53 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu н} = E_1 / I_0 = 160,53 / 1,487 = 107,955 \text{ Ом.}$$

Расчетные параметры схемы замещения сведены в таблицу 2.3.

Используя параметры схемы замещения, можно произвести расчет механических и электромеханических характеристик.

Таблица 2.3—Расчетные параметры схемы замещения АД

$R_1, \text{Ом}$	$R_2', \text{Ом}$	$X_{кн}, \text{Ом}$	$X_{1н}, \text{Ом}$	$X_{2н}', \text{Ом}$	$X_{\mu н}, \text{Ом}$
30,697	28,612	29,33	12,318	15,855	107,955

2.4. Расчет и построение естественной механической и электромеханических характеристик электродвигателя

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя определяется следующим выражением

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{\text{лн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 28,612}{157,1 \cdot s \cdot \left[29,612^2 + \left(30,697 + \frac{28,612}{s} \right)^2 + \left(\frac{30,697 \cdot 28,612}{s \cdot 107,955} \right)^2 \right]}.$$

Естественная механическая характеристика двигателя приведена на рисунке 2.4.

Механическая характеристика (рисунок 2.4), полученная при расчетах по параметрам схемы замещения, соответствует асинхронному двигателю с ненасыщенной магнитной системой, а её своеобразие определяется зависимостью индуктивного сопротивления ротора от скольжения.

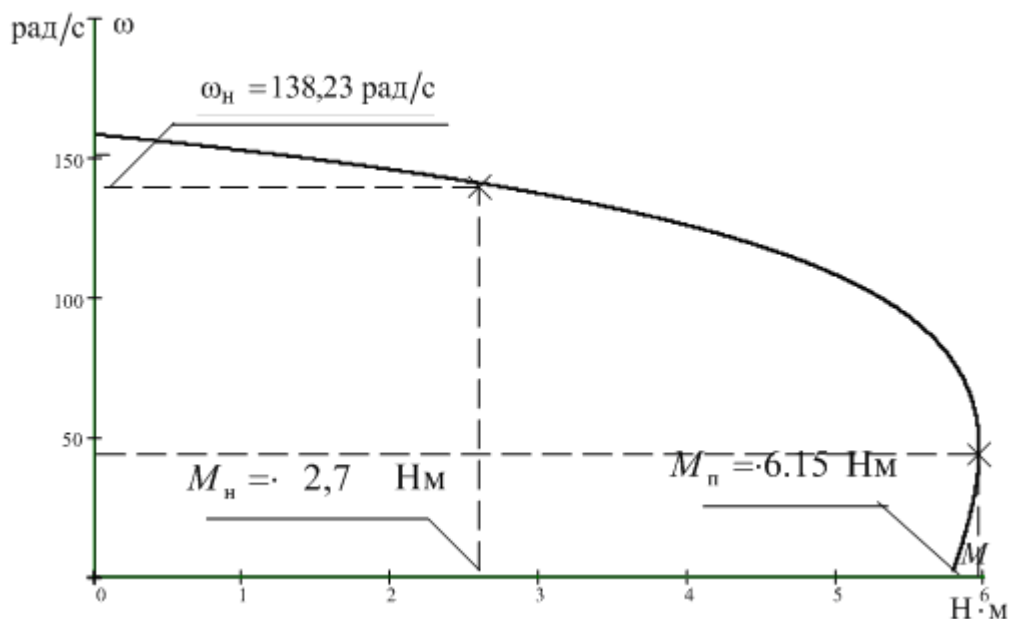


Рисунок 2.4 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя $M = f(\omega)$

В соответствии с паспортными данным электродвигателя (таблица 1)

$$M_{\text{мин}} = k_{\text{мин}} \cdot M_{\text{н}} = 1,8 \cdot 2,7 = 4,86 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{макс}} = k_{\text{макс}} \cdot M_{\text{н}} = 2,2 \cdot 2,7 = 5,94 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{п}} = k_{\text{п}} \cdot M_{\text{н}} = 2,3 \cdot 2,7 = 6,21 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

т.е. действительный пусковой момент превышает расчетное значение в $\frac{6,21}{5,78} \approx 1,065$ раза, величина максимального момента меньше расчетного на 4%,

что объясняется потерями на охлаждение и в подшипниковых узлах. Таким образом, рассчитанные значения параметров схемы замещения достаточно точно соответствуют действительным параметрам электродвигателя.

Выражение для расчета электро механической характеристики, определяющей зависимость приведенного тока ротора от скольжения s

$$I_2'(s) = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{(30,697 + \frac{28,612}{s})^2 + 29,612^2 + \left(\frac{30,697 \cdot 28,612}{s \cdot 107,955}\right)^2}}.$$

Естественная электро механическая характеристика асинхронного двигателя $I_2' = f(\omega)$ приведена на рисунке 2.5.

Ток статора \bar{I}_1 определяется путем сложения вектора тока намагничивания \bar{I}_0 и вектора тока ротора \bar{I}_2' согласно векторной диаграмме (рисунок 2.2). Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя I_0 реактивным ($I_{0A} = 0$), ток статора I_1 через приведенный ток ротора I_2' найдем по формуле

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} =$$

$$= \sqrt{1,487^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 1,487 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где
$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_{\mu\text{н}}^2}} = \frac{29,33}{\sqrt{(30,697 + \frac{28,612}{s})^2 + 107,955^2}}.$$

Естественная электромеханическая характеристика $I_1 = f(\omega)$ приведена на рисунке 2.5.

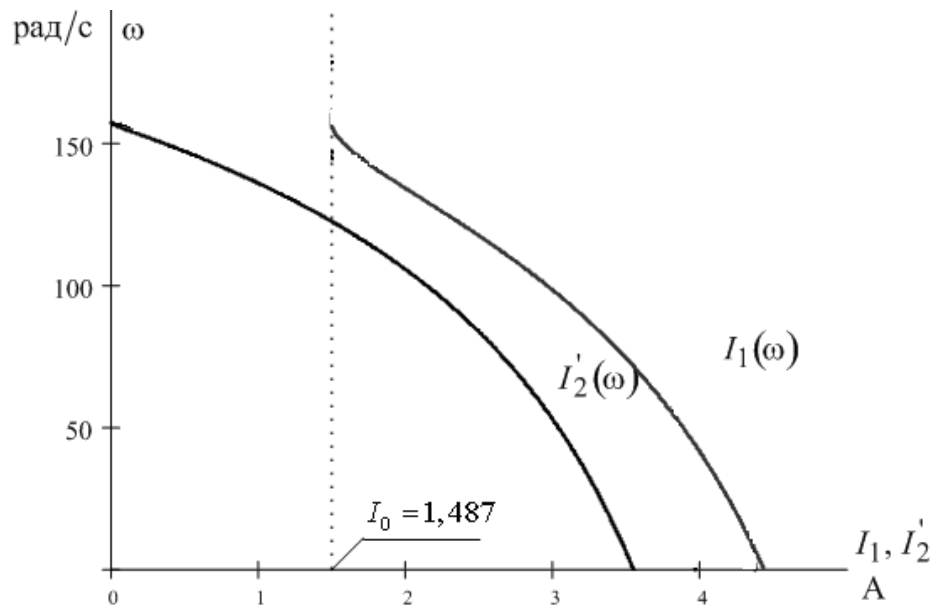


Рисунок 2.5 – Электромеханические характеристики асинхронного двигателя $I_1 = f(\omega)$, $I_2' = f(\omega)$

2.5. Расчетная схема замещения механической системы

Расчетная схема замещения механической системы электропривода этикетировочной машины, представленная в виде одностепенной системы, показана на рисунке 2.6.

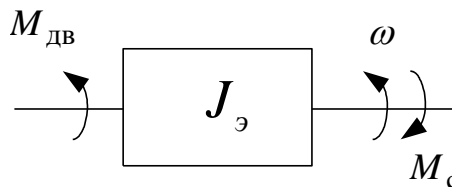


Рисунок 2.6 – Расчетная схема механической системы привода

Принятые обозначения:

$M_{\text{дв}}$ – вращающий момент, развиваемый на валу электродвигателя;

$M_{\text{с}}$ – момент нагрузки, приведенный к валу двигателя;

ω – угловая скорость;

$J_{\text{э}}$ – эквивалентный момент инерции привода.

Эквивалентный момент инерции

$$J_{\text{э}} = J_{\text{дв}} = 0,0014 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $J_{\text{дв}} = 0,0014 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции электродвигателя;

2.6. Выбор преобразователя частоты и управляющего контроллера

При выборе преобразователей частоты для электроприводов этикетировочной машины необходимо учитывать следующие важные особенности: возможность обеспечения высокой точности поддержания скорости и плавности регулирования; хорошо организованная система защит и предупреждений; возможность интеграции в систему управления более высокого уровня. Другие характеристики преобразователя частоты не так важны, но можно считать, что они будут соответствовать требованиям к современному электроприводу

В соответствии с поставленной задачей и исходя из [6] для асинхронного электропривода целесообразно использовать преобразователи Lenze. Эти преобразователи используются во многих областях промышленности (станкостроение, робототехника, бумажное и текстильное производство, упаковочное и фасовочное производство) и полностью отвечают условиям поставленной задачи, обладая гибкими прикладными возможностями, легким и быстрым вводом в действие, надежностью и высоким качеством.

В качестве преобразователей частоты для электроприводов верхнего и нижнего транспортеров выбираем преобразователи серии 9300 vector – векторно-управляемые преобразователи, которые лучше всего подходят для требовательных систем. По данным производителя, качественная работа привода обеспечивается даже без обратной связи по скорости.

Выбранный преобразователь обладает следующим рядом возможностей:

- выбор рабочего режима:
 - закон управления U/f ;
 - векторное управление, стабилизация скорости без датчика обратной связи;
- перегрузочная способность до 150 % даже при 0.5 Гц;
- автоматическое определение параметров двигателя;
- Предуславливаемые функции:
 - регулирование скорости/момента;
 - ступенчатое управление;
 - регулирование пройденного пути;
 - цифровое частотное соединение;
- легко конфигурируемая блочная структура;
- интегрированная системная шина.

Lenze 9300 Vector – преобразователь частоты для асинхронных двигателей. Предназначен для сложных систем с высокими требованиями по динамике и точности регулирования. В режиме управления потоком сцеплением ротора АД с помощью вектора напряжения с обратной связью по скорости или без нее обеспечивает высокую точность управления асинхронными приводами. В режиме управления потоком сцеплением ротора с помощью вектора тока удовлетворяет высоким требованиям по точности и динамике, приближаясь к возможностям сервопривода.

Технические характеристики и размеры преобразователя частоты приведены в таблице 2.4.

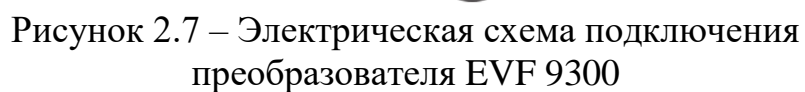
Таблица 2.4 – Характеристики преобразователя частоты EVF9300

Тип	Мощность [кВт]	Напряжение электропитания	Размеры (В×Ш×Г) [мм]	Мас са [кг]
EVF9321-EV	0.37	400 В (3 ~ 320 ... 528 В ± 0%) 45 ... 65 Гц ± 0%	350×78×250	5

Таблица 2.5 – Технические характеристики преобразователя частоты EVF9300

Наименование параметра	Значение
Номинальная выходная мощность, кВА	0,37
Номинальный выходной ток, А	1,5
Максимальный выходной ток в течение 1 минуты, %	2,2 (0,5 Гц)
Максимальное выходное напряжение, В	380-480
Диапазон регулирования частоты, Гц	0,01–150
Количество фаз сети	3
Частота сети, Гц	(50÷60)±2
Защитное исполнение	IP20
Диапазон регулирования скорости	1:100 – векторное разомкнутое управление 1:1000 – векторное замкнутое управление
Разрешение по выходной частоте, Гц	0,001
Защита от перегрузки по току, %	200

Схема подключения преобразователя представлена на рисунке 2.7.



31

визуальной инспекции, работает с местным постом управления. Контроллер производит контроль команд местного и дистанционного управления, формирует управляющие воздействия электродвигателей основного и прижимного транспортера, определяет возникновение аварийных режимов блока, выдает информационные и аварийные сообщения и индикацию блока.

На рисунке 2.8 представлена схема применения выбранного контроллера.

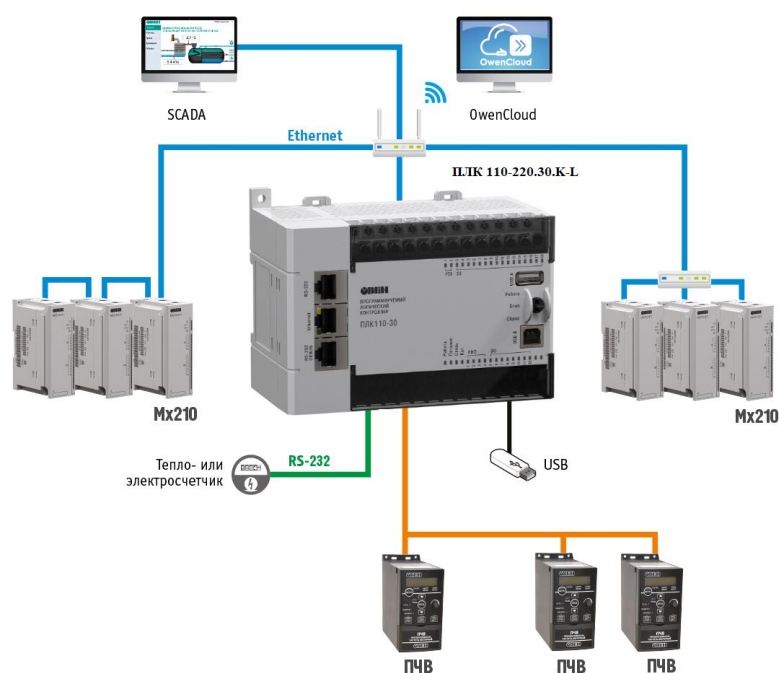


Рисунок 2.8 – Схема применения контроллера ПЛК 110-220.30.K-L

В будущем за счет выбранного контроллера возможна модернизация всей системы, а именно: ввод контроля штрих-кодов, ввод дополнительных датчиков контроля продукции и т.д.

3. Оптимизация линеаризованной САУ СЭП

3.1. Математическая модель асинхронного двигателя

При разработке математической модели асинхронного двигателя считаем, что параметры и переменные, относящиеся к обмоткам ротора, приведены к числу витков обмотки статора.

Состояние многофазной машины переменного тока в стационарном и переходных режимах описывается потокоцеплениями обмоток статора и ротора и угловой скоростью ротора. Потокоцепления являются направленными величинами, вращающимися в плоскости, перпендикулярной оси двигателя. Если считать эту плоскость комплексной, то потокоцепления могут быть представлены векторами:

$$\overline{\Psi}_1 = \overline{I}_1 \cdot L_1 + \overline{I}_2 \cdot L_m ; \quad (1)$$

$$\overline{\Psi}_2 = \overline{I}_2 \cdot L_2 + \overline{I}_1 \cdot L_m . \quad (2)$$

Каждый вектор тока и пропорциональный ему вектор потока равен геометрической сумме компонент, образуемых в отдельных фазах. Для трёхфазной обмотки, оси которой смещены в пространстве на 120° , Результирующий вектор тока:

$$I = \frac{2}{3} \cdot (I_a + I_b \cdot e^{j120^\circ} + I_c \cdot e^{j240^\circ}) .$$

Токи в фазах можно определить, как проекции вектора тока на соответствующие оси обмоток.

В неподвижной системе координат:

$$\overline{U}_1 = \overline{I}_1 \cdot R_1 + \frac{d\overline{\Psi}_1}{dt} ; \quad (3)$$

$$\overline{U}_2 = \overline{I}_2 \cdot R_2 + \frac{d\overline{\Psi}_2}{dt} . \quad (4)$$

Во вращающейся системе координат

$$\overline{U}_1 = \overline{I}_1 \cdot R_1 + \frac{d\overline{\Psi}_1}{dt} + j \cdot \omega_\kappa \cdot \overline{\Psi}_1 ; \quad (5)$$

$$\overline{U}_2 = \overline{I}_2 \cdot R_2 + \frac{d\overline{\Psi}_2}{dt} + j \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \overline{\Psi}_2. \quad (6)$$

Из уравнений (1) и (2) выразим:

$$\overline{I}_2 = \frac{1}{L_2} \cdot \overline{\Psi}_2 - \frac{L_m}{L_2} \cdot \overline{I}_1; \quad (7)$$

$$\overline{\Psi}_1 = \overline{I}_1 \cdot L'_1 + \overline{\Psi}_2 \cdot \frac{L_m}{L_2}. \quad (8)$$

С учётом (8) уравнение (5) примет вид:

$$\overline{U}_1 = (R' + p \cdot L'_1) \cdot \overline{I}_1 - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \overline{\Psi}_2 - j \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \overline{\Psi}_2 + j \cdot \omega_\kappa \cdot \left(L'_1 \cdot \overline{I}_1 + \frac{L_m}{L_2} \cdot \overline{\Psi}_2 \right)$$

Выражая векторы через составляющие по осям x , y вращающейся системы координат, т.е. выделяя вещественную и мнимую части, имеем:

$$U_{1x} = (R' + pL'_1) \cdot I_{1x} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} - z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \omega \cdot \Psi_{2y}; \quad (9)$$

$$U_{1y} = (R' + pL'_1) \cdot I_{1y} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} + z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \omega \cdot \Psi_{2x}. \quad (10)$$

Вообще говоря $U = e_{\text{об}} + i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt}$, поэтому в формулах (9) и (10)

можно выделить соответствующие внутренней ЭДС двигателя по осям x и y :

$$e_{\text{оax}} = - \left[R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \right];$$

$$e_{\text{оay}} = - \left[R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \right].$$

Подставив (7) в (6), получим:

$$\overline{U}_2 = \left(\frac{R_2}{L_2} + p \right) \cdot \overline{\Psi}_2 - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \overline{I}_1 + j \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \overline{\Psi}_2.$$

Раскладывая вектор на скаляры в системе x , y , получим:

$$U_{2x} = \left(\frac{R_2}{L_2} + p \right) \cdot \Psi_{2x} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1x} - (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y}; \quad (11)$$

$$U_{2y} = \left(\frac{R_2}{L_2} + p \right) \cdot \Psi_{2y} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1y} + (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x}. \quad (12)$$

Уравнения (9) - (12) – уравнения электрического равновесия цепей статора и ротора – дополним уравнением электромагнитного момента:

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \quad (13)$$

и уравнением движения

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

Уравнения (9) - (14) позволяют построить математическую модель асинхронной машины в общем случае в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k . Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $U_{2x} = U_{2y} = 0$.

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может быть реализована либо путём численного решения дифференциальных уравнений, либо путём имитационного моделирования по структурной схеме.

Система дифференциальных уравнений в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k , имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_{1x}}{dt} &= \frac{1}{L'_1} \cdot U_{1x} - \frac{R'_1}{L'_1} \cdot I_{1x} + \frac{R_2}{L'_1} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2x} + \omega_k \cdot I_{1y} + \frac{L_m}{L'_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\ \frac{dI_{1y}}{dt} &= \frac{1}{L'_1} \cdot U_{1y} - \frac{R'_1}{L'_1} \cdot I_{1y} + \frac{R_2}{L'_1} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2y} - \omega_k \cdot I_{1x} - \frac{L_m}{L'_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\ \frac{d\Psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2x} + R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1x} + (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\ \frac{d\Psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2y} + R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1y} - (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) - M_c \right] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При $\omega_k=0$ система (16) представляет собой математическую модель АД в неподвижной системе координат.

Структурная схема двигателя приведена на рисунке 2.8

3.2. Разработка системы управления

Система уравнений для составления структурной схемы АД с короткозамкнутым ротором в системе координат, вращающейся со скоростью ω_k , имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1x} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_k \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\ U_{1y} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1y} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_k \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot I_{1x} - T_2 \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot I_{1y} + T_2 \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\ M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \\ p \cdot \omega &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_c) \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где $K_2 = \frac{L_m}{L_2}$; $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$; $T_1 = \frac{L'_1}{R'} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R'}$; $R' = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}$; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$; $L' = \sigma \cdot L_1$.

Структурная схема двигателя во вращающейся системе координат и имитационная модель двигателя приведены на рисунках 3.4. и 3.5.

Если во вращающейся системе координат совместить ось x с вектором потокосцепления ротора, то $|\overline{\Psi}_2| = \Psi_{2x}$, $\Psi_{2y} = 0$ и система (17) приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned}
I_{1x} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[U_{1x} + \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} + L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} \right] \\
I_{1y} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[U_{1y} - K_2 \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} \right] \\
\Psi_{2x} &= \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1} \cdot I_{1x} \\
\omega_\kappa &= z_p \cdot \omega + \frac{L_m}{T_2} \cdot \frac{I_{1y}}{\Psi_{2x}} \\
M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot \Psi_{2x} \cdot I_{1y} \\
\omega &= \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M - M_c)
\end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Системе уравнений (18) соответствует структурная схема, приведённая на рисунке 3.1. На рисунке 3.2 представлена имитационная модель двигателя в программной среде Matlab Simulink

Параметры структурной схемы приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры структурной схемы

R' , Ом	L' , Гн	T_1 , с	T_2 , с	K_2	z_p
6,507	0,0271	0,00417	0,0849	0,944	2

В структурной схеме можно выделить 2 канала регулирования:

- потокосцепления $\Psi_{2x} (U_{1x} \rightarrow \Psi_{2x})$;
- тока $(U_{1y} \rightarrow I_{1y})$.

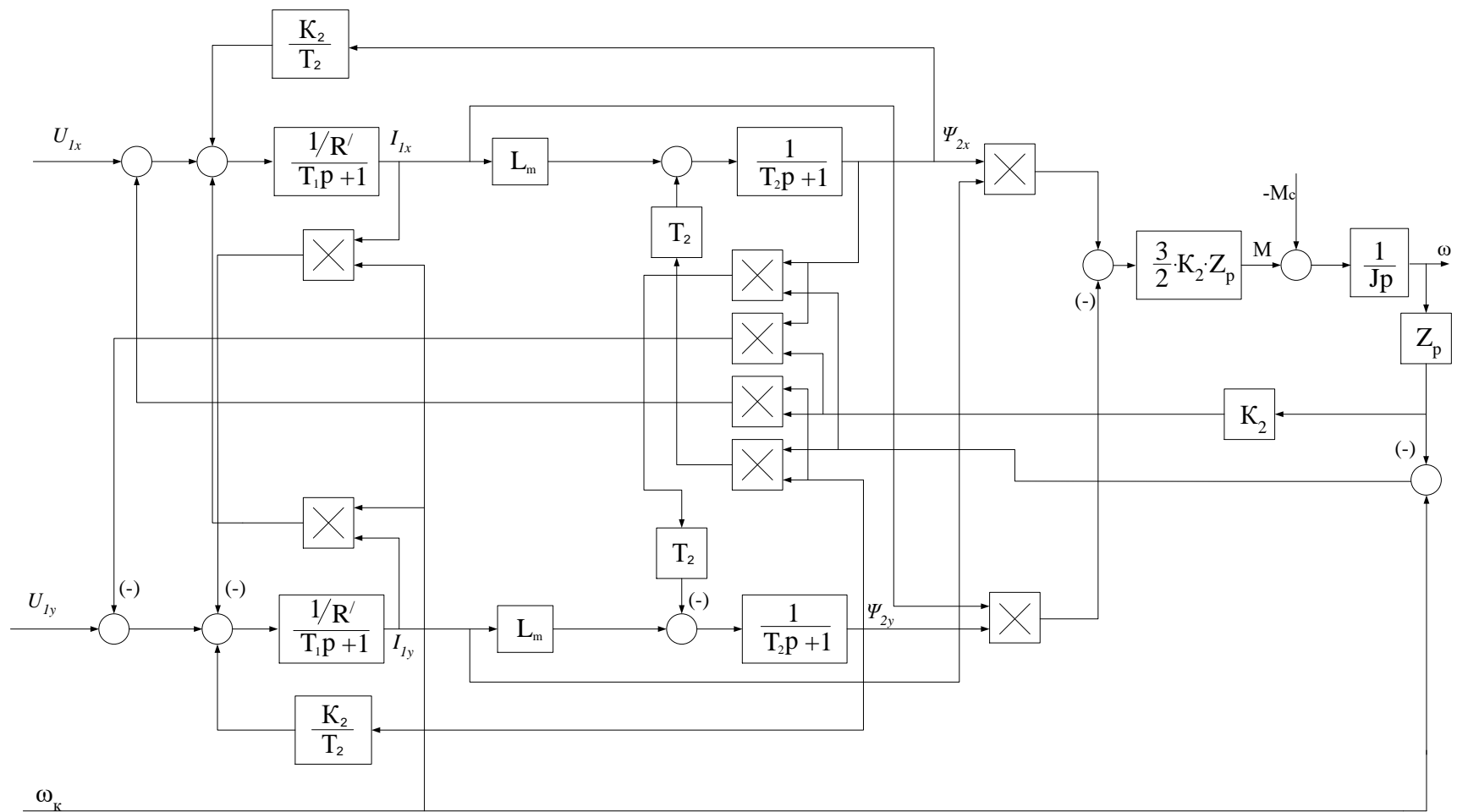


Рисунок 3.1 – Структурная схема двигателя во вращающейся системе координат

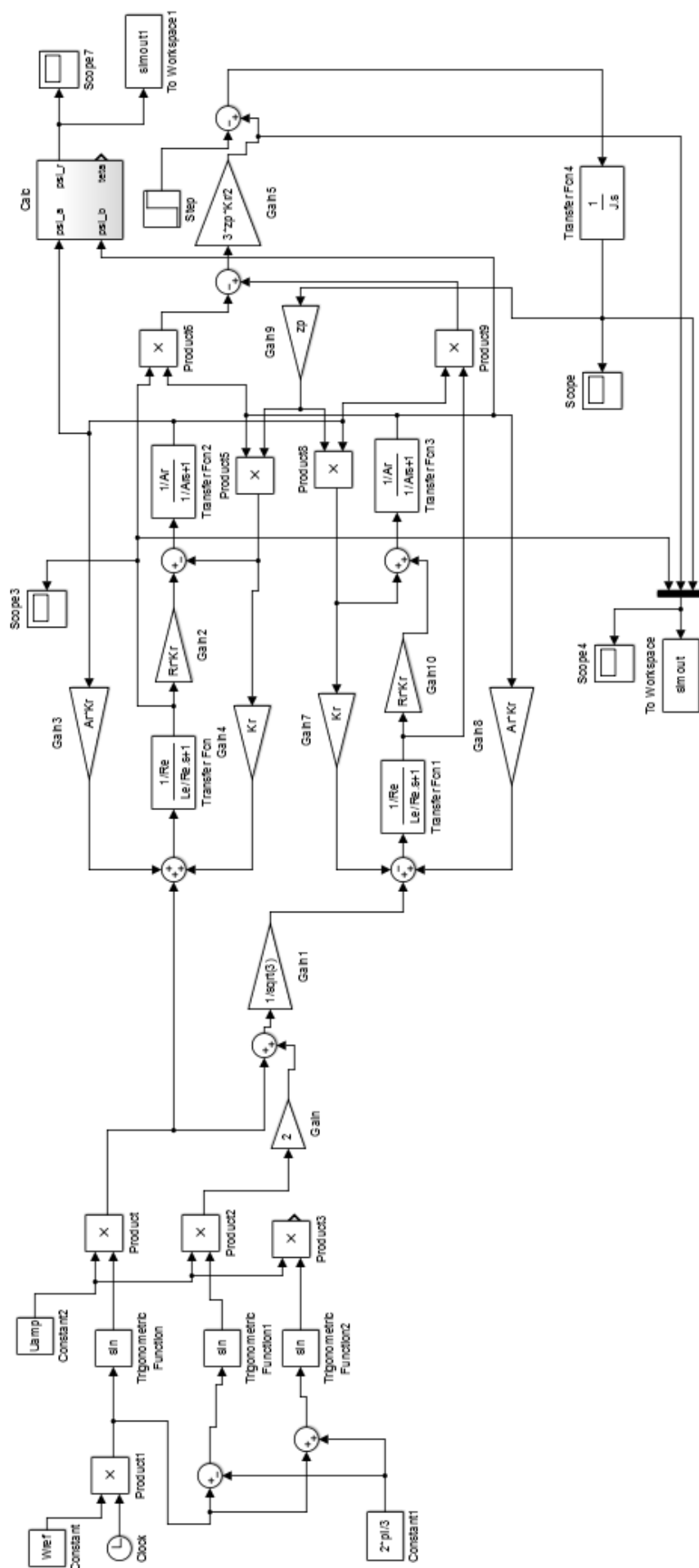


Рисунок 3.2 – Имитационная модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат в программной среде MATLAB Simulink

Рассчитанные переходные процессы прямого пуска двигателя приведены на рисунках 3.3 – 3.5.

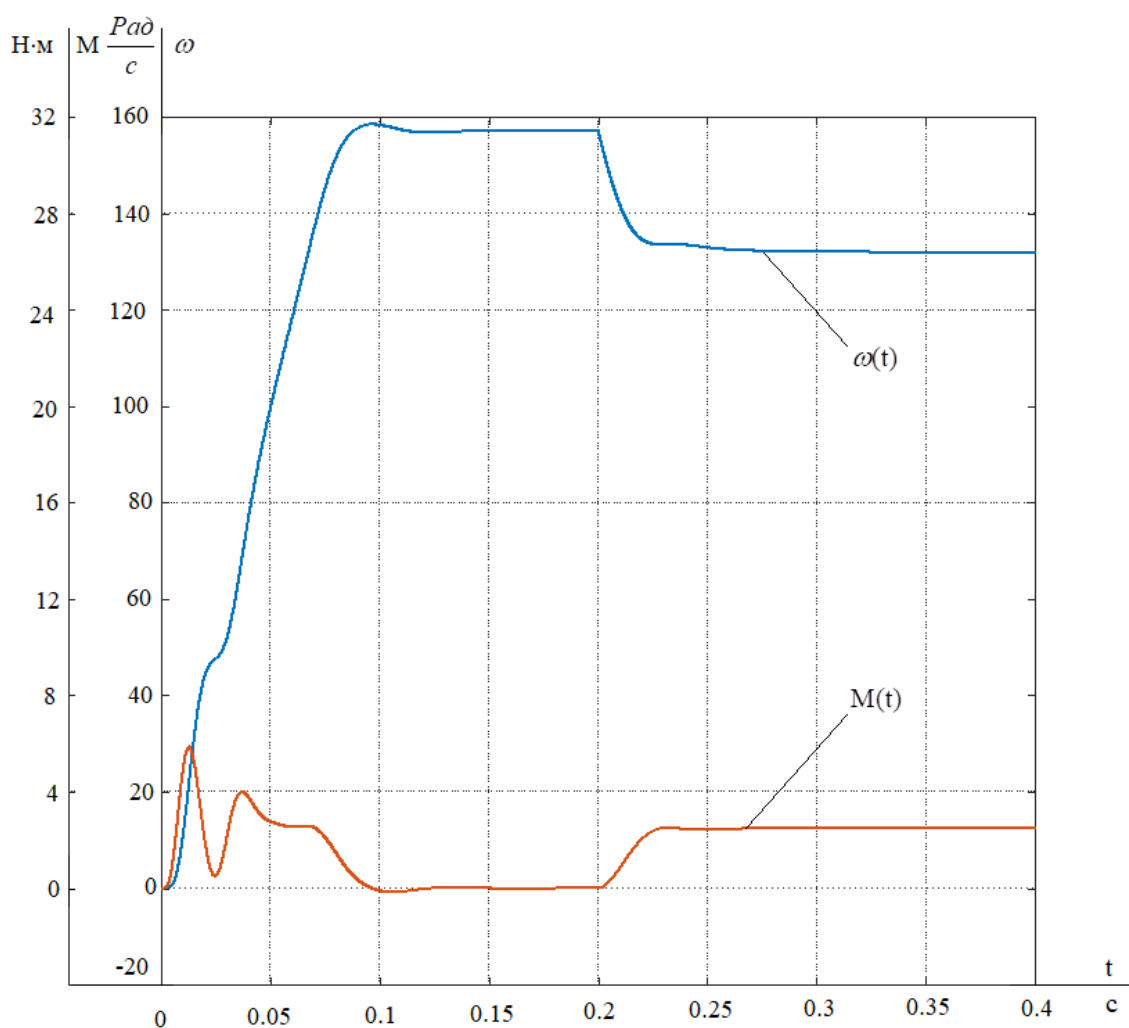


Рисунок 3.3 – Переходные процессы прямого пуска двигателя $\omega(t)$ и $M(t)$

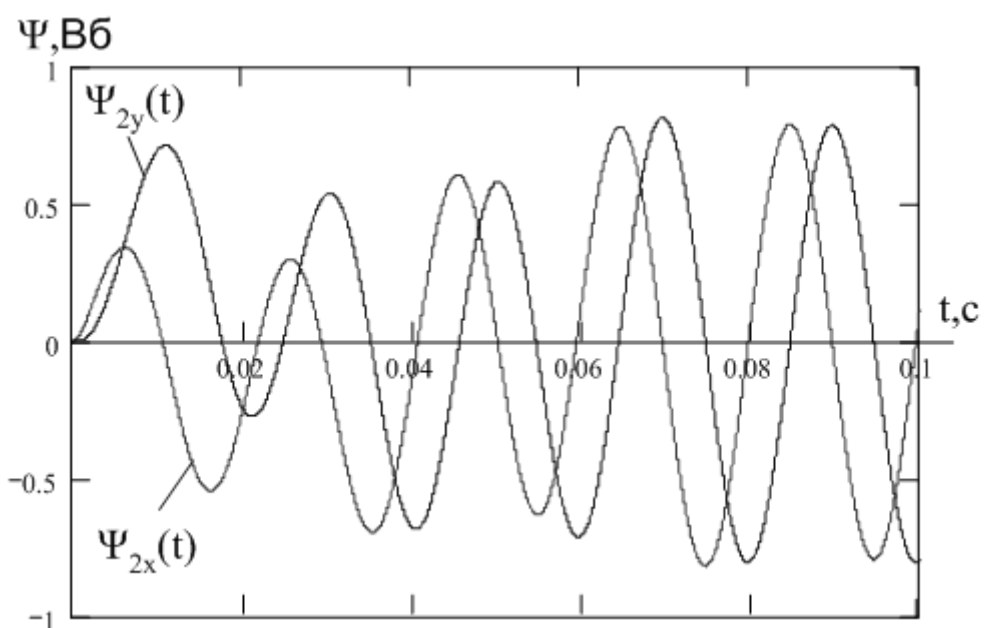


Рисунок 3.4 – Переходные процессы при прямом пуске двигателя

$\Psi_{2x}(t)$ и $\Psi_{2y}(t)$

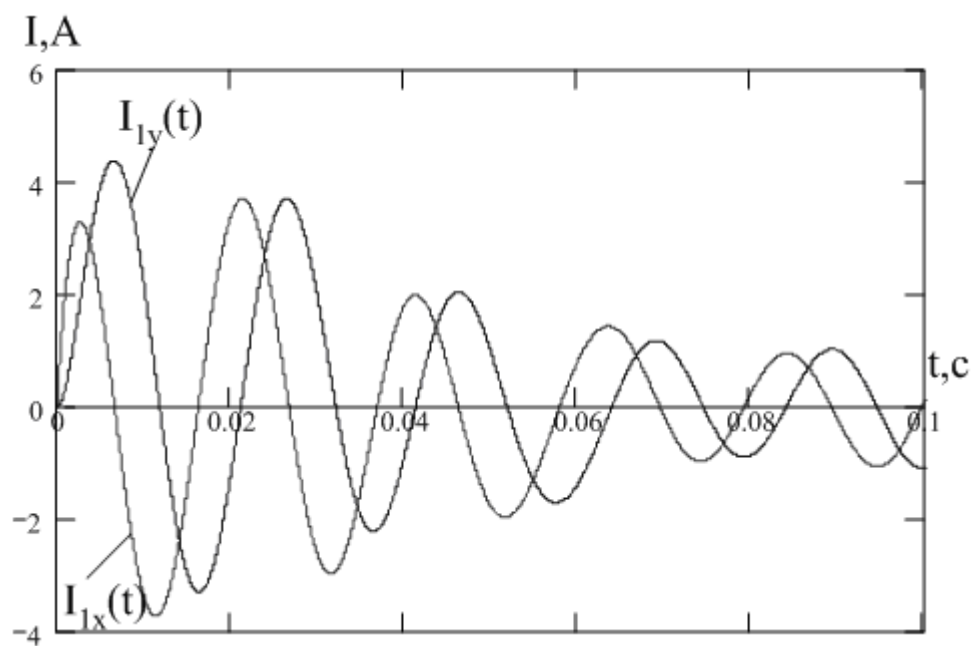


Рисунок 3.5 – Переходные процессы при прямом пуске двигателя
 $I_{1x}(t)$ и $I_{1y}(t)$

3.3. Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода

Оптимизацию выполняем при следующем допущении. Считаем, что влияние внутренней ЭДС двигателя скомпенсировано, т.е. не учитываем

$$e_{\text{оэк}} = -\frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L_1 \cdot \omega_{\kappa} \cdot I_{1y};$$

$$e_{\text{оэy}} = K_2 \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} + L_1 \cdot \omega_{\kappa} \cdot I_{1x}.$$

При этих допущениях структурную схему САУ можно рассматривать в виде двух независимых САУ: САУ потокосцепления и САУ скорости. Структурная схема силового канала для этого случая приведена на рисунке 3.6. Синтез параметров регуляторов будет производиться по методике, описанной в [4].

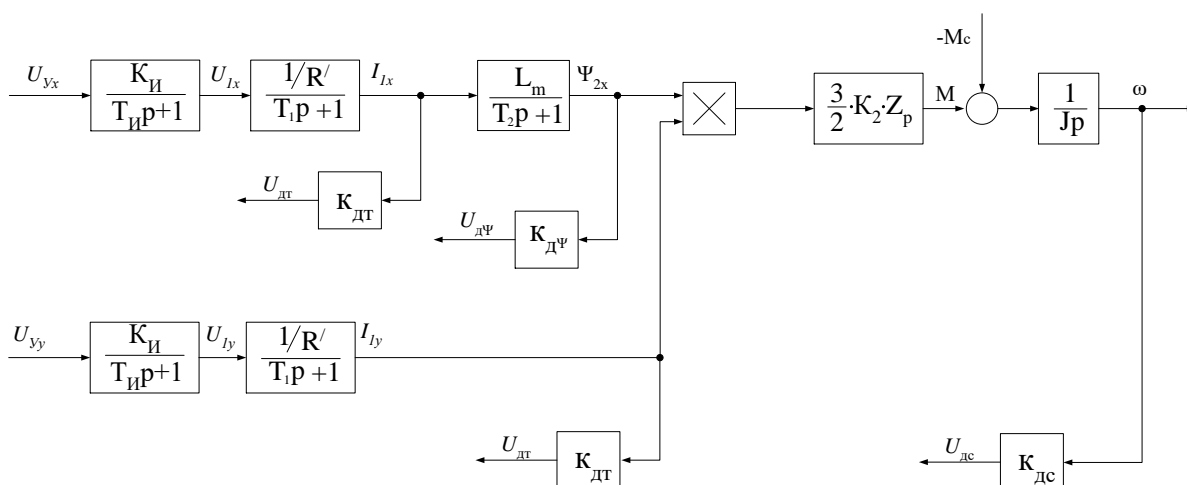


Рисунок 3.6 – Структурная схема силовой цепи

3.3.1. Оптимизация контура тока

Структурная схема контура приведена на рисунке 3.7.

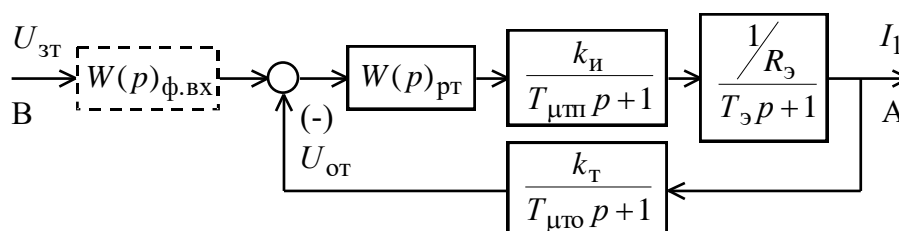


Рисунок 3.7 – Структурная схема контура тока

Контур содержит:

- апериодическое звено с большой постоянной времени
 $T_1 = 0,001602 \text{ с}$;
- апериодическое звено с малой постоянной времени в прямом канале

$$T_{\text{и}} = \frac{0,5}{f_{\text{шум}}} = \frac{0,5}{8 \cdot 10^3} = 0,0000625 \text{ с},$$

где $f_{\text{шум}} = 8 \text{ кГц}$ – частота инвертора;

- апериодическое звено с малой постоянной времени в цепи обратной связи

$$T_{\text{фг}} = \frac{T_{\text{р.кг}}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с}$$

где $T_{\text{р.кг}} = 0,001 \text{ с}$ – время обчёта токового контура [5].

В качестве малой некомпенсируемой постоянной времени принимаем
 $T_{\text{мг}} = T_{\text{и}} + T_{\text{фг}} = 0,0000625 + 0,000333 = 0,000395 \text{ с}$.

Для оптимизации по модульному оптимуму (МО) принимаем ПИ – регулятор тока с передаточной функцией

$$W_{\text{рт}}(p) = k_{\text{рт}} \cdot \frac{T_{\text{рт}} \cdot p + 1}{T_{\text{рт}} \cdot p},$$

где $T_{\text{рт}} = T_1 = 0,001602 \text{ с}$ – постоянная времени регулятора тока;

$$k_{\text{рт}} = \frac{T_1 \cdot R_{\text{с}}}{k_{\text{и}} \cdot k_{\text{т}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мг}}} = \frac{0,001602 \cdot 56,864}{31,1 \cdot 4,54 \cdot 2 \cdot 0,000395} = 0,817 \quad \text{– коэффициент усиления регулятора;}$$

$$k_{\text{т}} = \frac{U_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{1макс}}} = \frac{10}{2,2} = 4,54 \frac{\text{В}}{\text{А}} \quad \text{– коэффициент обратной связи по току;}$$

$U_{\text{зт.макс}}$ – максимальное напряжение задания на ток $U_{\text{зт.макс}} = 10 \text{ В}$;

$a_{\text{т}} = 2$ – коэффициент оптимизации контура тока по МО.

$I_{\text{1макс}} = 2,2 \text{ А}$ – максимальный кратковременный ток преобразователя (см. таблицу 2.4).

Так как контур тока является частью внешнего контура, то для корректировки перерегулирования в нем на входе контура установлен сглаживающий фильтр с передаточной функцией

$$W(p)_{\text{ф вх}} = \frac{1}{T_{\text{ф вх}} \cdot p + 1},$$

постоянную времени которого выбираем из условия

$$T_{\text{ф вх}} = T_{\text{ф вх3}} = T_{\text{мто}} = 0,000333 \text{ с}.$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

$\sigma = 4,3\%$ – перерегулирование;

$t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,000395 = 0,0016195 \text{ с}$ – время первого согласования;
 $t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,000395 = 0,0016195 \text{ с}$ – время переходного процесса при
 отработке ступенчатого управляющего задания;
 $\omega_{\Pi}^{(м)} = \omega_{\Pi}^{(ф)} = \frac{0,71}{T_{\mu T}} = \frac{0,71}{0,000395} = 1797,47 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – полоса пропускания по модулю
 и фазе. $f_{\Pi}^{(м)} = f_{\Pi}^{(ф)} = 286 \text{ Гц}$

Передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{раз.T}(p) = \frac{1}{a_T \cdot T_{\Pi} \cdot T_{\Phi T} \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p^3 + a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p^2 + a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p}$$

Передаточная функция замкнутого контура тока

$$W_{зам.T}(p) = \frac{1/\kappa_T \cdot (T_{\Phi T} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\Pi} \cdot T_{\Phi T} \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p^3 + a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p^2 + a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p + 1}$$

При установке на входе контура фильтра с передаточной функцией

$$W_{\Phi.BX.T}(p) = \frac{1}{T_{\Phi.BX.T} \cdot p + 1}$$

и выборе $T_{\Phi.BX.T} = T_{\Phi T}$

$$W_{зам.T}(p) = \frac{1/\kappa_T}{a_T \cdot T_{\Pi} \cdot T_{\Phi T} \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p^3 + a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p^2 + a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{1/\kappa_T}{a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) \cdot p + 1} = \frac{\kappa_T}{T_{ТЭ} \cdot p + 1}$$

где $T_{ТЭ} = a_T \cdot (T_{\Pi} + T_{\Phi T}) = 2 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,00079 \text{ с}$

По структурной схеме контура тока набирается имитационная модель, представленная на рисунке 3.8. Параметры звеньев приведены в протоколе.

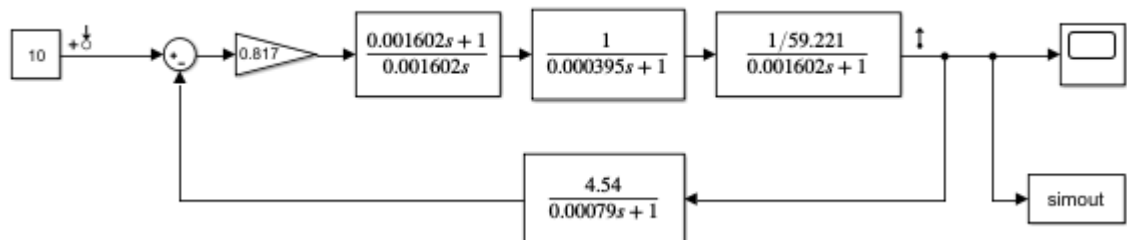


Рисунок 3.8 – Имитационная модель контура тока

Результаты моделирования переходных процессов в контуре тока, настроенным на модульный оптимум при отработке ступенчатого входного воздействия $U_{3T} = 10 \text{ В}$ приведены в виде переходной характеристики $i(t)$ на рисунке 3.9.

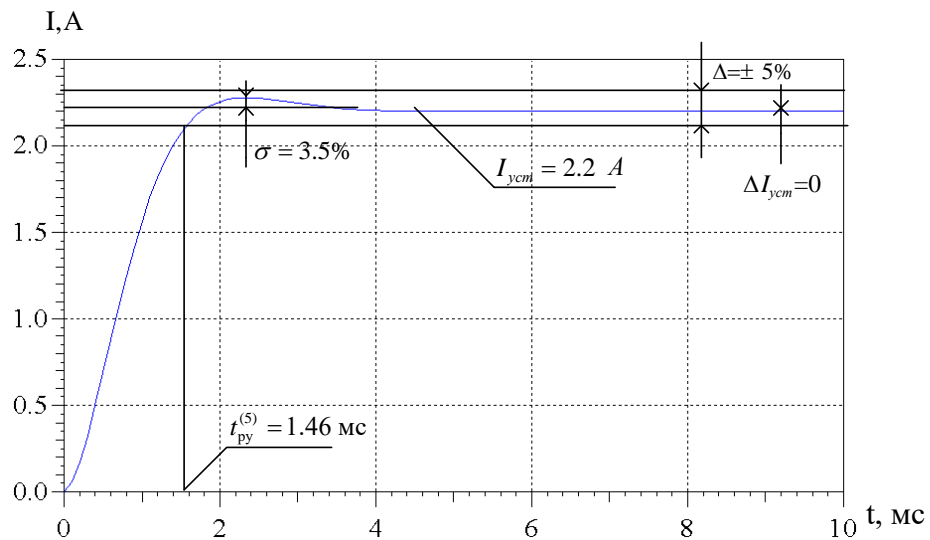


Рисунок 3.9 - Переходный процесс $i(t)$ контура тока по структурной схеме (рисунок 3.7)

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что они соответствуют ожидаемым показателям работы контура.

Для наглядности сведем показатели качества в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели работы контура тока

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	4,3	3.5
$t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)}, c$	0,0016195	0,00146

3.3.2. Оптимизация контура потокосцепления

Структурная схема контура потокосцепления приведена на рисунке 3.10.

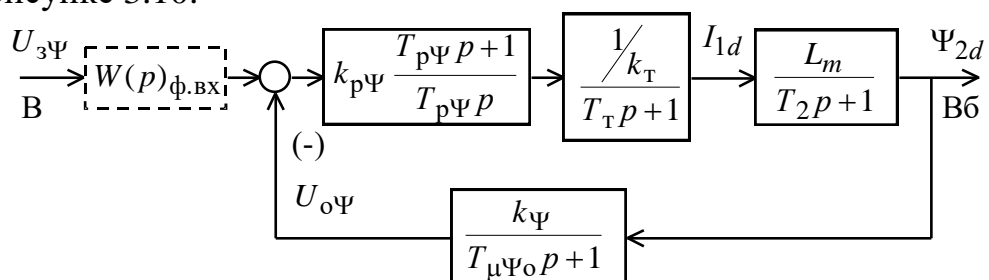


Рисунок 3.10 – Структурная схема контура потокосцепления

Для усреднения результатов расчета потокосцепления в цепи обратной связи контура установлен фильтр с передаточной функцией [5]

$$W_{\Phi\Psi}(p) = \frac{1}{T_{\Phi\Psi} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,000333 \cdot p + 1} ,$$

$$T_{\Phi\Psi} = T_{\Phi T} = \frac{T_{P.K\Psi}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с} - \text{ постоянная времени фильтра,}$$

где $T_{P.K\Psi} = 0,001 \text{ с}$ – время обсчёта контура [5].

Контур содержит:

- апериодическое звено с большой постоянной времени

$$T_2 = 0,02797 \text{ с} ;$$

- апериодическое звено в цепи обратной связи

$$\text{с малой постоянной времени } T_{\Phi\Psi} = T_{\Phi T} = \frac{T_{P.K\Psi}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с}$$

и в цепи обратной связи $T_{\mu\Psi_0} = 0,00267 \text{ с}$;

- апериодическое звено второго порядка, представляющее замкнутый оптимизированный контур тока, которое в первом приближении представим инерционным звеном первого порядка с малой постоянной времени $a_T \cdot T_{\mu T} = T_{TЭ} = 0,00079 \text{ с}$.

В качестве малой некомпенсируемой постоянной времени принимаем

$$T_{\mu\Psi} = T_{TЭ} + T_{\Phi\Psi} = 0,00079 + 0,000333 = 0,001123 \text{ с} .$$

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению

$$k_{\Psi} = \frac{U_{3\Psi \text{ макс}}}{\Psi_{2\text{ ном}}} = \frac{U_{3\Psi \text{ макс}}}{\sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m} = \frac{10}{0,827} = 12,09 \frac{B}{Bб} .$$

Контур потокосцепления настраиваем на МО. С учетом параметров

контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{p\Psi}(p) = k_{p\Psi} \cdot \frac{T_{p\Psi} \cdot p + 1}{T_{p\Psi} \cdot p} ,$$

где

$$\kappa_{p\Psi} = \frac{\kappa_T \cdot T_2}{\kappa_\Psi \cdot L_m \cdot a_c \cdot T_{\mu\Psi}} = \frac{4,54 \cdot 0,02797}{10 \cdot 1,096 \cdot 2 \cdot 0,001123} = 5,15 \quad - \quad \text{коэффициент регулятора}$$

потокосцепления;

$T_{p\Psi} = T_2 = 0.02797$ с – постоянная времени регулятора потокосцепления.

передаточная функция разомкнутого контура потокосцепления:

$$W_{\text{раз.}\Psi}(p) = \frac{1}{a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu\Psi} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\Phi\Psi} \cdot p^3 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot (a_T \cdot T_{\mu T} + T_{\Phi\Psi}) \cdot p^2 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot p}$$

Передаточная функция замкнутого контура потокосцепления:

$$W_{\text{замк.}\Psi}(p) = \frac{1/\kappa_\Psi \cdot (T_{\Phi\Psi} \cdot p + 1)}{a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu\Psi} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\Phi\Psi} \cdot p^3 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot (a_T \cdot T_{\mu T} + T_{\Phi\Psi}) \cdot p^2 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot p + 1}$$

При установке на входе фильтра с передаточной функцией

$$W_{\Phi.BX.\Psi}(p) = \frac{1}{T_{\Phi.BX.\Psi} \cdot p + 1} = \frac{1}{T_{\Phi\Psi} \cdot p + 1}$$

Передаточная функция замкнутого контура потокосцепления будет иметь вид:

$$W_{\text{замк.}\Psi}(p) = \frac{1/\kappa_\Psi}{a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu\Psi} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\Phi\Psi} \cdot p^3 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot (a_T \cdot T_{\mu T} + T_{\Phi\Psi}) \cdot p^2 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot p + 1}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного на МО

$\sigma = 8,1\%$ - перерегулирование;

$t_{\text{py1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\Psi} = 7 \cdot 0,001123 = 0,007861$ с - время первого согласования;

$t_{\text{py2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\Psi} = 12 \cdot 0,001123 = 0,013476$ с - время переходного процесса

при отработке ступенчатого управляющего задания;

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{0,5}{T_{\mu\Psi}} = \frac{0,5}{0,001123} = 445,23 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad - \quad \text{полоса пропускания по модулю};$$

$$f_{\Pi}^{(M)} = 71,23 \text{ Гц}$$

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu\Psi}} = \frac{0,35}{0,001123} = 311,665 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad - \quad \text{полоса пропускания по фазе.}$$

$$f_{\Pi}^{(\Phi)} = 50 \text{ Гц}$$

По структурной схеме контура потокосцепления (см. рисунок 3.10) набирается имитационная модель, представленная на рисунке 3.11.

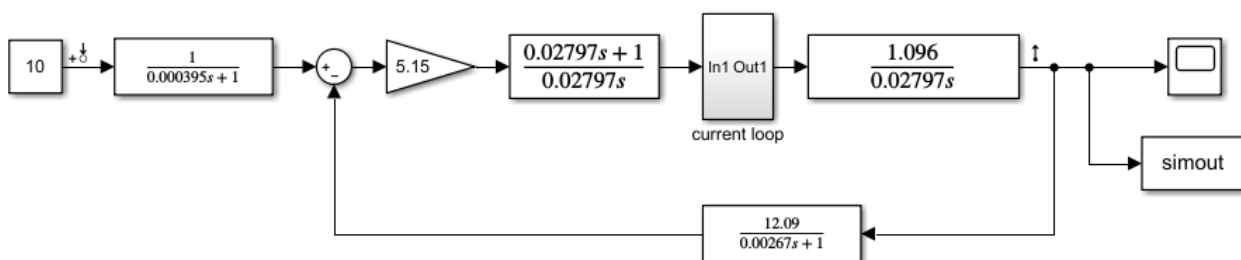


Рисунок 3.11 – Имитационная модель контура потокосцепления

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенным на модульный оптимум, при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{з\psi} = 10$ В приведены в виде переходных характеристик $\Psi(t)$ и $I(t)$ на рисунке 3.12.

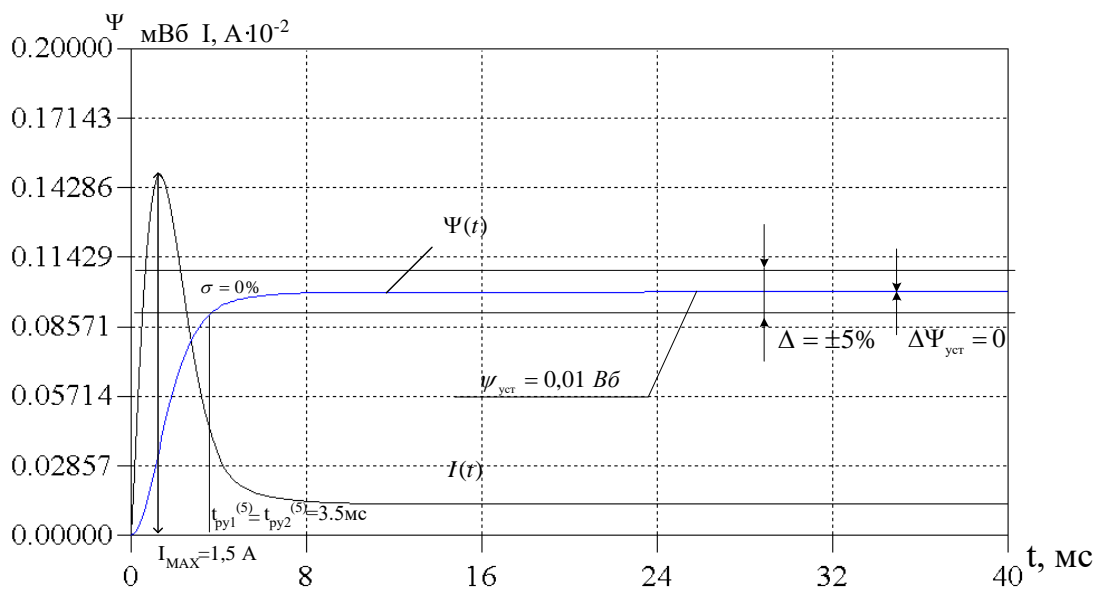


Рисунок 3.12 – Переходные характеристики $\Psi(t)$ и $i(t)$ контура потокосцепления

Таблица 3.3 – Показатели работы замкнутого контура потокосцепления

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	8,1	0
$t_{py1}^{(5)}, c$	0,0078361	0,0035
$t_{py2}^{(5)}, c$	0,01374	0,0035

Разница экспериментальных и ожидаемых параметров связана с наличием апериодического звена первого порядка в цепи обратной связи контура и на его входе.

3.3.3. Оптимизация САР скорости

Структурная схема линейаризованной САР скорости приведена на рисунке 3.13.

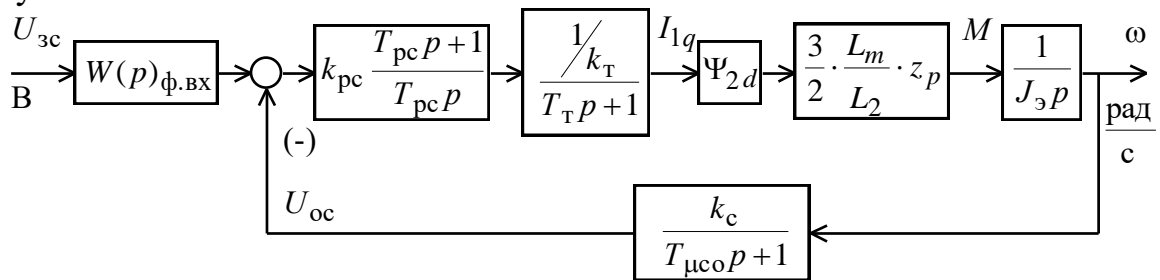


Рисунок 3.13 – Структурная схема контура скорости

Контур содержит:

- апериодическое звено с малой постоянной времени
 $T_{тэ} = 2 \cdot (T_{и} + T_{фТ}) = 2 \cdot (0,000062 + 0,000333) = 0,00079 \text{ с} ;$
- звено с малой постоянной времени в цепи обратной связи
 $T_{фс} = T_{фТ} = 0,000333 \text{ с} ;$
- интегрирующее звено
 $\frac{1}{J \cdot p}$

В качестве малой некомпенсируемой постоянной времени принимаем $T_{μс} = T_{тэ} + T_{фс} = 0,00079 + 0,000333 = 0,001123 \text{ с}$

Контур скорости настраиваем на СО. С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p},$$

где k_{pc} – коэффициент усиления регулятора.

$a_c = 2$ – коэффициент оптимизации контура скорости по МО;

$T_{μс} = T_{тэ} + T_{фТ} = 0,00079 + 0,000333 = 0,001123 \text{ с}$ – малая постоянная времени контура скорости.

$k_c = \frac{U_{зс \text{ макс}}}{\omega_{\text{макс}}} = \frac{10}{157,08} = 0,0637 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ – коэффициент обратной связи по скорости;

$U_{зс \text{ макс}} = 10 \text{ В}.$

$T_{PC} = \epsilon_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} = 2 \cdot 2 \cdot 0,001123 = 0,004492$ с – постоянная времени регулятора скорости;

$$\kappa_{PC} = \frac{\kappa_T \cdot J_{ЭП}}{\frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot Z_P \cdot \kappa_C \cdot \Psi_{2x} \cdot a_C \cdot T_{\mu C}} = \frac{4,54 \cdot 0,0014}{\frac{3}{2} \cdot 0,9351 \cdot 2 \cdot 0,0637 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,001123} = 31,67$$

– коэффициент усиления регулятора скорости

Передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{раз.C}(p) = \frac{1}{b_C \cdot a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\mu I} \cdot p^4 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot (T_{\mu T} + T_{\mu I}) \cdot p^3 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot p}$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости:

$$W_{замк.C}(p) = \frac{1/\kappa_C \cdot (b_C \cdot a_T \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot p + 1)}{b_C \cdot a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\mu I} \cdot p^4 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot (T_{\mu T} + T_{\mu I}) \cdot p^3 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot p + 1}$$

При установке на входе фильтра с передаточной функцией

$$W_{\phi.BX.C}(p) = \frac{1}{T_{\phi.BX.C} \cdot p + 1} = \frac{1}{T_{\phi C} \cdot p + 1}$$

Передаточная функция замкнутой системы будет иметь вид:

$$W_{замк.C}(p) = \frac{1/\kappa_C}{b_C \cdot a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\mu I} \cdot p^4 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot (T_{\mu T} + T_{\mu I}) \cdot p^3 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} \cdot p + 1}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного на СО

$\sigma = 6,2$ % - перерегулирование;

$t_{pyl}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu T} = 13,6 \cdot 0,001123 = 0,0152728$ с – время первого согласования;

$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{0,284}{T_{\mu C}} = \frac{0,284}{0,001123} = 252,89 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – полоса пропускания по модулю;

$\omega_{\Pi}^{(M)} = 40,5$ Гц

$\omega_{\Pi}^{(\phi)} = \frac{0,18}{T_{\mu T}} = \frac{0,18}{0,001123} = 160,28 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – полоса пропускания по фазе.

$\omega_{\Pi}^{(\phi)} = 25,6$ Гц

По структурной схеме контура скорости набирается имитационная модель, представленная на рисунке 3.14.

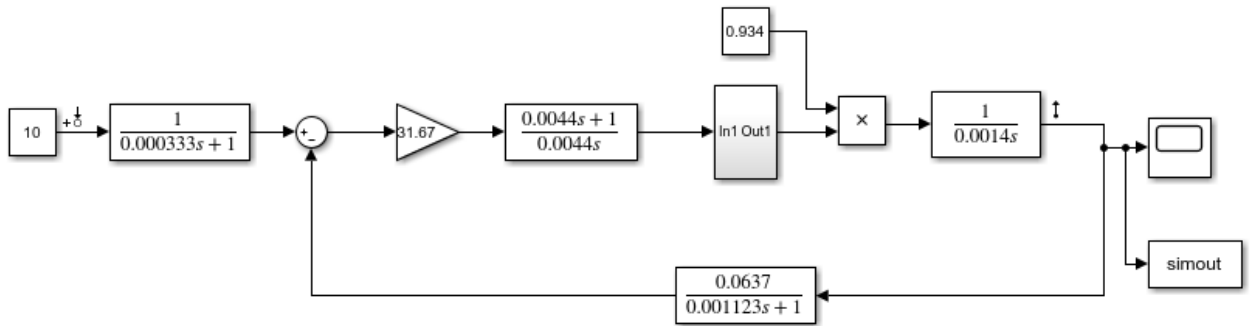


Рисунок 3.14 – Имитационная модель контура скорости

Результаты моделирования переходных процессов в контуре скорости, настроенным на симметричный оптимум, при отработке ступенчатого входного воздействия $U_{\text{зс}} = 10 \text{ В}$ приведены в виде переходной характеристики $\omega(t)$ на рисунке 3.15.

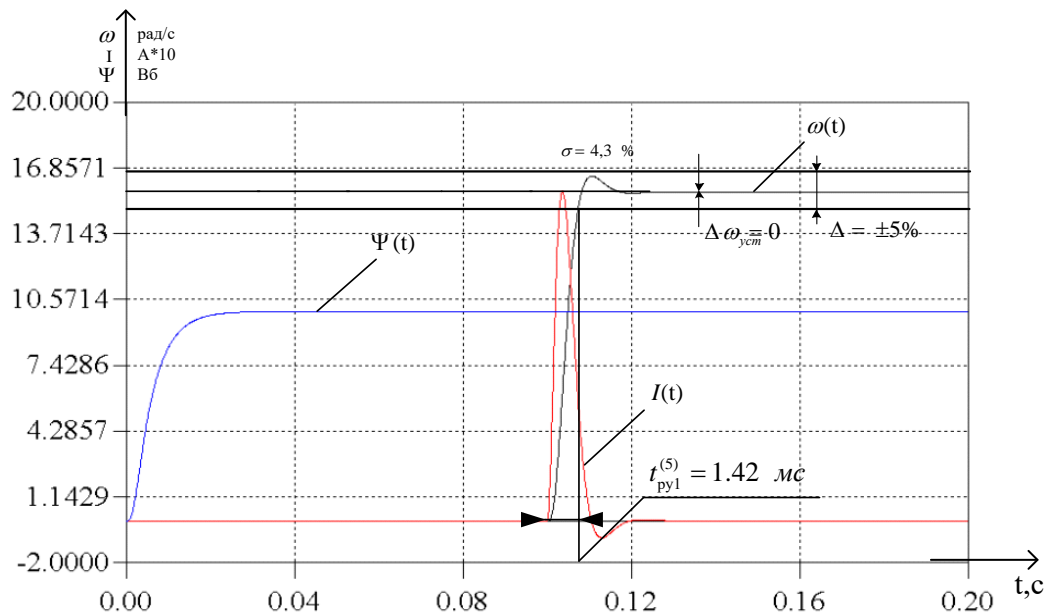


Рисунок 3.15 – Переходные характеристики $I(t)$, $\omega(t)$ и $\Psi(t)$

Таблица 3.4 – Показатели работы замкнутого контура скорости

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	6,2	4,3
$t_{\text{py1}}^{(5)} \text{ с}$	0,0152728	0,0142

Отличие экспериментальных показателей качества переходных процессов от ожидаемых объясняется наличием малой постоянной времени не только в прямом, но и в канале обратной связи контура.

3.3.4. Оптимизация контура положения

Электропривод приёмного устройства представляет собой сложную многоконтурную структуру автоматического регулирования, замкнутую по положению.

Структурная схема контура положения приведена на рисунке 3.16.

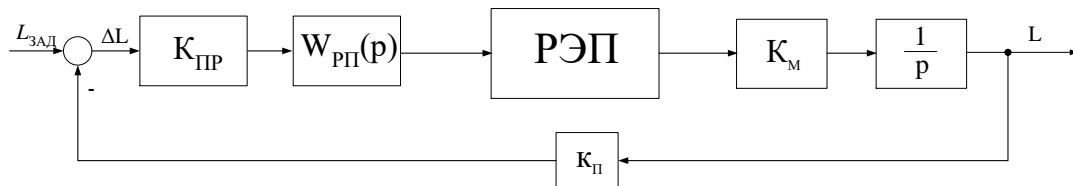


Рисунок 3.16 – Структурная схема контура положения

При оптимизации контура положения внутренний оптимизированный контур скорости представим аperiodическим звеном первого порядка с перед функцией:

$$W_{РЭП} = \frac{1/k_c}{T_{\muп} p + 1}.$$

Таким образом, контур положения содержит инерционное звено первого порядка с малой постоянной времени $T_{\muп}$, пропорциональные звенья и интегрирующее звено. Для обеспечения астатизма второго порядка (нулевой скоростной ошибки) настройку осуществляем на симметричный оптимум, с учётом параметров контура выбираем ПИ-регулятор положения с передаточной функцией:

$$W_{рп}(p) = k_{рп} \cdot \frac{T_{pn} \cdot p + 1}{T_{pn} \cdot p}, \text{ где}$$

$$k_{рп} = \frac{k_c}{k_m \cdot k_{п} \cdot k_{np} \cdot a_n \cdot T_{\muп}} - \text{коэффициент усиления регулятора положения;}$$

$T_{\muп} = a_c \cdot a_t \cdot T_{\muт} = 2 \cdot 2 \cdot 0,001123 = 0,004492 \text{ с}$ – малая постоянная времени контура;

$k_{\Pi} = 0,46$ – коэффициент обратной связи контура по положению;

$a_{\Pi} = 2$ – коэффициент оптимизации контура положения по СО.

$T_{pn} = 4 \cdot T_{\mu\Pi} = 4 \cdot 0,004492 = 0,017968$ с.

$$k_{\text{рп}} = \frac{k_c}{k_m \cdot k_{\Pi} \cdot a_{\Pi} \cdot T_{\mu\Pi}} = \frac{0,0637}{114,8 \cdot 0,46 \cdot 2 \cdot 0,004492} = 0,133647$$

В соответствии с принятым допущением, упрощенная передаточная функция контура положения при его настройке на симметричный оптимум имеет вид:

$W_{\Pi.\text{раз}}(p) = \frac{4 \cdot T_{\mu\Pi} \cdot p + 1}{8 \cdot T_{\mu\Pi}^2 \cdot p^2 \cdot (T_{\mu\Pi} \cdot p + 1)}$ – передаточная функция разомкнутого контура положения;

$W_{\Pi.\text{замк}}(p) = \frac{4 \cdot T_{\mu\Pi} \cdot p + 1}{8 \cdot T_{\mu\Pi}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\mu\Pi}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\mu\Pi} \cdot p + 1}$ – передаточная функция замкнутого контура положения;

Такая настройка гарантирует отсутствие скоростной ошибки.

По структурной схеме контура положения набирается имитационная модель, представленная на рисунке 3.17.

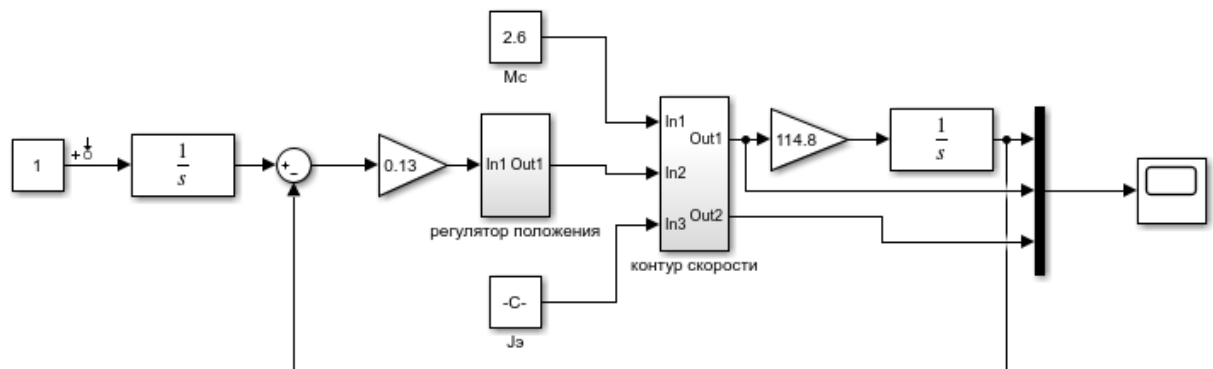


Рисунок 3.17 – Имитационная модель контура положения

Результаты моделирования переходных процессов в контуре положения, настроенном на симметричный оптимум, при отработке линейно нарастающего входного воздействия $U_{\text{зн}} = 10 \cdot t$ В приведены в виде переходной характеристики $\varphi(t)$ на рисунке 3.18.

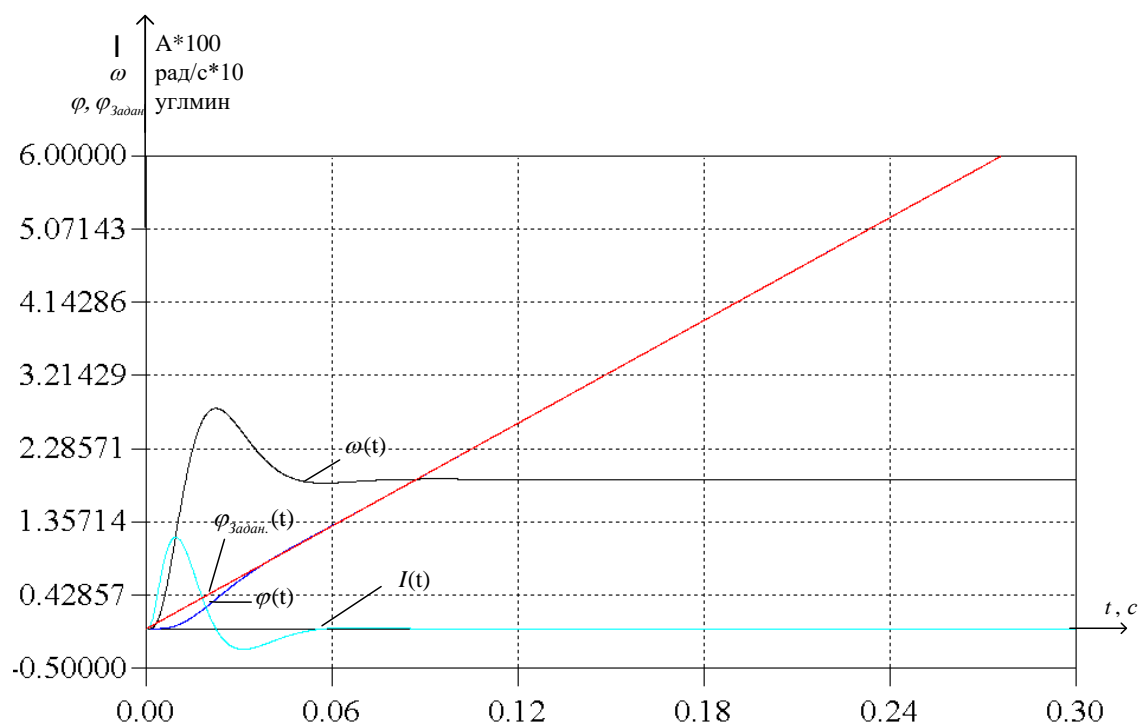


Рисунок 3.18 – Переходные характеристики $I(t)$, $\omega(t)$ и $\varphi(t)$

4. Исследование нелинейной САУ РЭП

Учитываем следующие нелинейности[7]:

- ограничение выходных сигналов регуляторов потокосцепления, тока, скорости и положения;
- ограничение выходного напряжения инвертора;
- реактивный характер нагрузки;

Одной из основных задач проектирования является обеспечение синхронизации скоростей и положений основного и прижимного транспортёров.

Для каждого из электроприводов предложена трехконтурная следящая система. Автоматическое управление с управлением от контроллера в режиме равномерной заводки (линейно - нарастающий входной сигнал)

$$U_{3C}(t) = \omega_{зад} \cdot t.$$

Структурная схема нелинейной САУ СЭП приведена на рисунке 4.1.

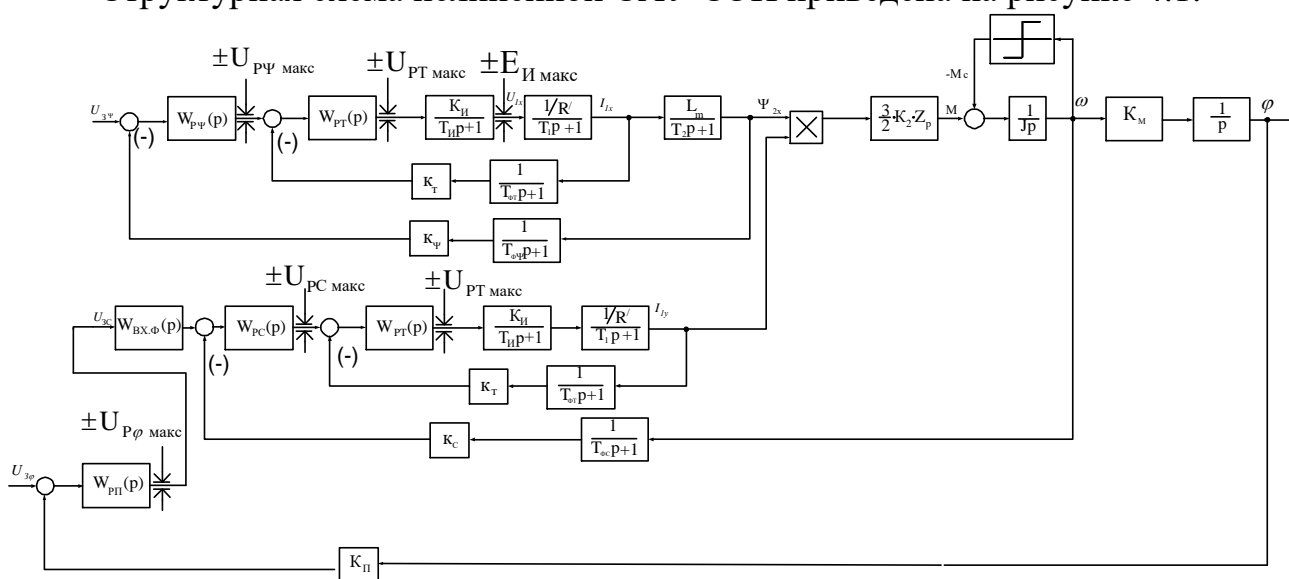


Рисунок 4.1 – Структурная схема нелинейной САУ СЭП

Для проверки правильности приближённого расчёта по структурной схеме (рисунок 4.1), в программе Matlab Simulink разработана имитационная модель, включающая две системы автоматического управления – верхнего и нижнего транспортёров.

Имитационная модель представлена на рисунке 4.2.

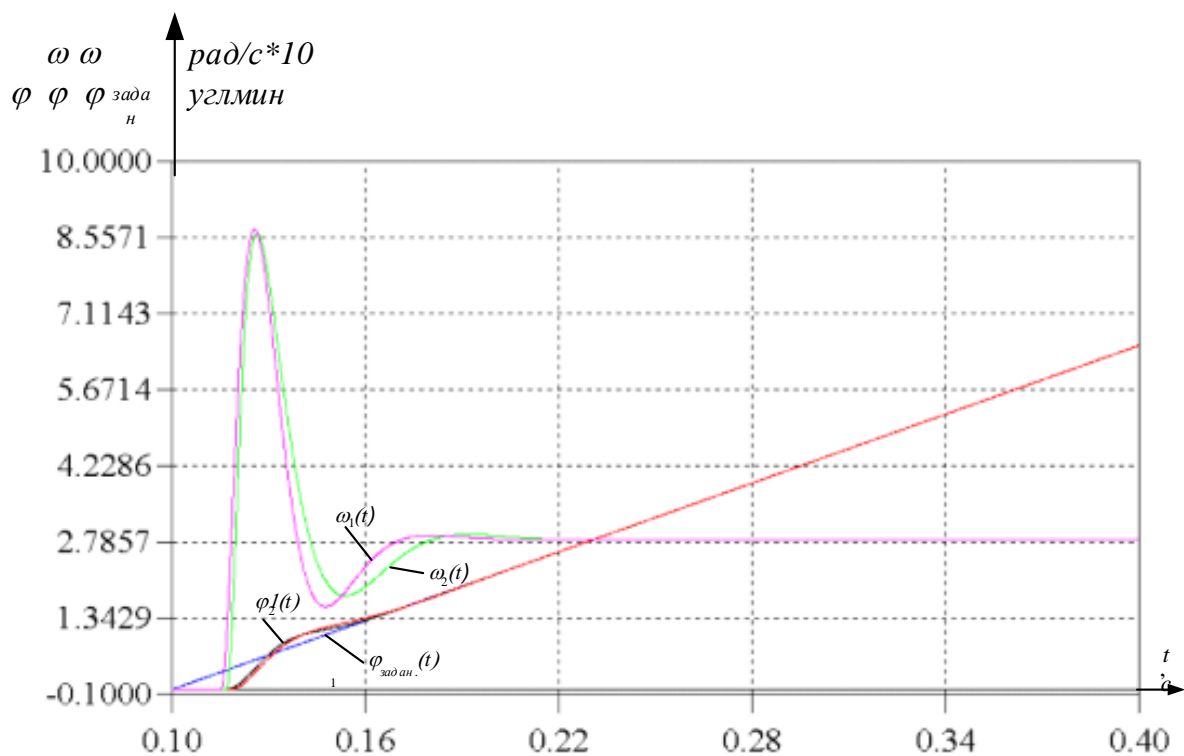


Рисунок 4.3 – Переходные процессы $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$

Ошибки отработки контурами положения линейно — нарастающего воздействия приведены на рисунке 4.4.

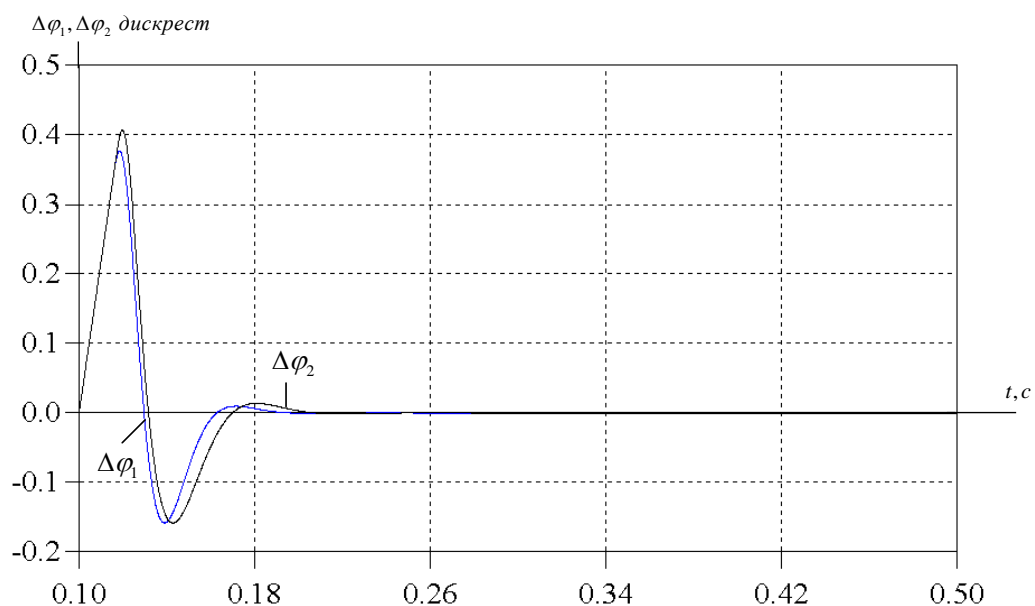


Рисунок 4.4 – Ошибки отработки при линейно — нарастающем входном воздействии $\Delta\varphi_1(t)$, $\Delta\varphi_2(t)$

Переходные процессы при обработке $U_{3\varphi}(t) = 75 \cdot t$ представлены на рисунке 4.7.

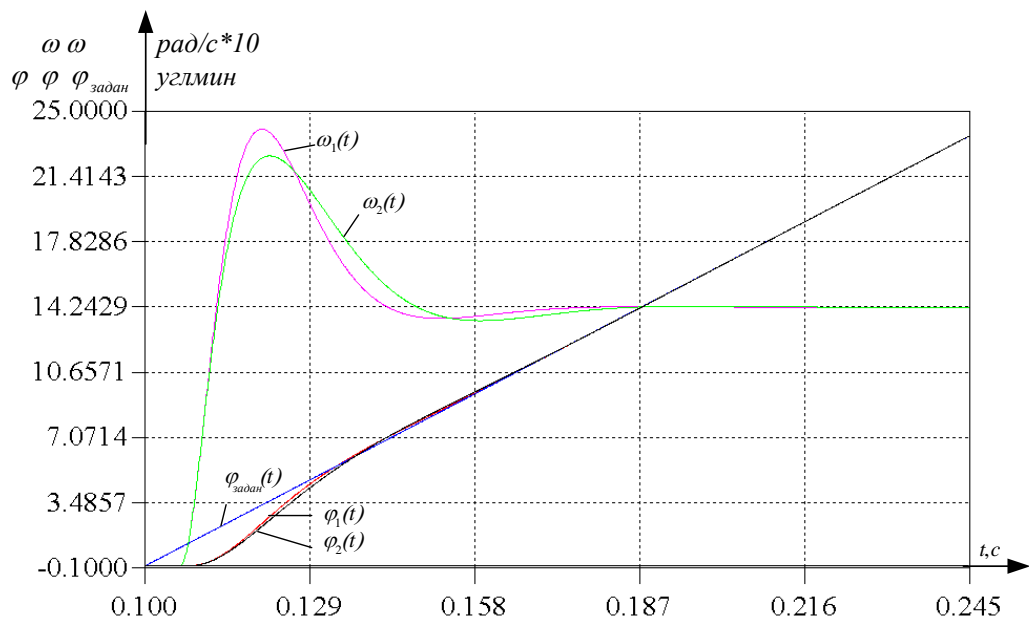


Рисунок 4.7 – Переходные процессы $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$

Выводы: результаты моделирования показали, что спроектированный электропривод удовлетворяет требованиям технического задания. Предложенный способ построения систем автоматического управления транспортёров в виде следящей системы с управлением от общего контроллера позволили осуществить синхронизацию скоростей и положений.

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Темой научной исследовательской работы является разработка асинхронного электропривода основного и прижимного транспортера этикетировочной машины с векторным управлением.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НТИ;
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;
4. Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

5.1. Техничко-экономическое обоснование НИР

Электропривод переменного тока с асинхронными электродвигателями становится все популярнее с каждым годом. На стороне асинхронных двигателей и простота конструкции, и, соответственно, надежность и долговечность, и высокие энергетические показатели.

К тому же, электроэнергию переменного тока, необходимую для этих двигателей, очень просто производить, преобразовывать и передавать на самые большие расстояния без особых потерь. В связи с этим замена привода постоянного тока на привод переменного тока позволит снизить затраты как на обслуживание этикетировочной машины, так и на производство итогового продукта.

Коммерческий потенциал у данного исследования ввиду вышеизложенного, значителен.

Произведем также в данном разделе SWOT-анализ НТИ, позволяющий оценить факторы и явления способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок. В таблице 4.4. описаны сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы реализации НТИ, которые могут появиться в его внешней среде.

Таблица 5.1 – SWOT-анализ НИР

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
С1. Метод компьютерного моделирования асинхронного электропривода является практичным и достаточно точным; С2. Метод, описанный в работе, несет в себе экономичность и ресурсоэффективность; С3. Наличие опытного руководителя.	В1. Простая адаптация научного исследования под иностранные языки; В2. Большой потенциал применения метода в России и других странах;
Слабые стороны	Угрозы внешней среды

Сл1. При исследовании слабых сторон не выявлено.	У1. Отсутствие необходимости ввода новой системы ввиду отлаженной работы устаревшего привода;
--	---

Далее выявим соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 5.2 – сильные стороны проекта

Возможности проекта		C1	C2	C3
	B1	+	+	+
	B2	+	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и возможности: B1C1C2C3, B2C1C2.

Таблица 5.3 – слабые стороны проекта

Возможности проекта		Сл1
	B1	0
	B2	0

Таблица 5.4 – сильные стороны проекта

Угрозы		C1	C2	C3
	У1	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы не удалось выявить коррелирующих сильных сторон и угроз.

Итак, самой большой угрозой для проекта является отсутствие спроса, к тому же данное решение не является единственным.

Что касается слабых сторон, то для данного метода, во избежание их влияния, требуется привлечение опытных кадров, обеспечить обучение нового персонала со знаниями материаловедения, механики и физики.

Таким образом, у данного исследования есть некоторый коммерческий потенциал, если учитывать необходимость замены устаревшего оборудования.

5.2. Планирование работ по научно-техническому исследованию

Для правильного планирования, а также финансирования и определения трудоемкости выполнения НИР необходимо ее разбить на этапы. Под этапом понимается крупная часть работы, которая имеет самостоятельное значение и является объемом планирования и финансирования. НИР имеет:

1. Подготовительный этап. Сбор, изучение и анализ, имеющийся информации. Определение состава исполнителей и соисполнителей, согласование с ними частных задач. Разработка и утверждение задания.

2. Разработка теоретической части.

3. Проведение численного эксперимента

4. Выводы и предложения по теме, обобщение результатов разработки.

5. Завершающий этап. Рассмотрение результатов исследования. Утверждение результатов работы. Подготовка отчетной документации. Данную НИР можно разделить на следующие этапы (Таблица 1):

- а) Разработка задания на НИР;
- б) Выбор направления исследования;
- в) Теоретические и экспериментальные исследования;
- г) Обобщение и оценка результатов;
- д) Оформление отчета НИР.

Работу выполняло 2 человека: руководитель, студент-дипломник.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Разделим выполнение дипломной работы на этапы, представленные в таблице 5.5:

Таблица 5.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение задания НИР	Чернышев А.Ю. – руководитель; Касымов Т.Ш. – студент-дипломник.
Проведение НИР			
Выбор направления исследования	2	Изучение метода компьютерного моделирования и поиск материалов по работе	Касымов Т.Ш.
	3	Выбор образцов для исследования	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.
	4	Календарное планирование работ	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование проведения численных экспериментов	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.
	6	Компьютерное моделирование	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.
	7	Обработка полученных данных	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ полученных результатов, выводы	Касымов Т.Ш.
	9	Оценка эффективности полученных результатов	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.
Оформление отчета НИР	10	Составление пояснительной записки	Касымов Т.Ш.

5.2.1 Определение трудоемкости этапов НИР

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\min i}}{5}, \quad (1)$$

Где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (4)$$

где $T_{кг}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вд}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пд}$ – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пл}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45,$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ T_k нужно округлить до целых чисел. [6]

5.2.2 Техническая готовность темы

Определение технической готовности темы позволяет дипломнику точно знать, на каком уровне выполнения находится определенный этап или работа. Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 6 месяцев, дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для начала следует определить удельное значение каждой работы в общей продолжительности работ:

$$Y_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где Y_i – удельное значение каждой работы в %;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

T_p – суммарная продолжительность темы, раб.дн.

Тогда техническую готовность темы Γ_i , можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $\sum T_{pi}$ – нарастающая продолжительность на момент выполнения i -той работы. [10]

Результаты расчетов приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Временные показатели проведения НИР

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ						
		t_{\min} чел- дн.	t_{\max} чел-дн	$t_{\text{ож}}$ чел- дн	T_p раб.дн	T_k кал.дн	Y_i , %	Γ_i , %
1	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	0,9	3,2	1,8	2	4	1,2	1,5
2	Касымов Т.Ш.	21	42	33,2	26,2	33	35,05	37,3
3	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	7	11	9	3,8	7	5,32	39,01
4	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	5	13	7	2,8	5	5,35	46,63
5	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	13	21	16	18	34	21,21	67,5
6	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	6	15	6	3	7	3,52	78,2
7	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	6	11	8	3,7	13	6,73	83,32
8	Касымов Т.Ш.	1	8	4	0,79	3	6,8	88,2
9	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	4	13	6	2,7	6	6,53	93,51
10	Касымов Т.Ш.	3	9	7	4.1	8	6,12	100
ИТОГО						120		

5.2.3 Построение графика работ

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. [9]

Таблица 5.7 – Календарный график проведения НИР

Этапы	Вид работы	Исполнители	T_k	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
1	Составление и утверждение задания НИР	Чернышев А.Ю., Касымов Т.Ш.	4					
2	Изучение метода компьютерного моделирования и поиск материалов по	Касымов Т.Ш.	33					

Рассчитываем смету расходов, включая затраты на приобретение необходимого оборудования для разработки проекта и текущие расходы. Затраты, образующие себестоимость продукции (работ, услуг), группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}}$$

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции. [9]

В данной работе моделирование проводится на компьютере поэтому материальных затрат нет.

Для проведения научно-исследовательской работы требуется компьютер.

Срок полезного использования: компьютер – по второй амортизационной группе (техника электронно-вычислительная): от 2 до 3 лет. [10]

Рассчитываем материальные затраты используется один компьютер стоимостью 20000 рублей

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в последующие годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году. [9]

Рассчитаем амортизацию оборудования техники $I_{\text{ам.обор}}$, по следующей формуле

$$I_{\text{ам.обор}} = \left(\frac{T_{\text{исп.обор}}}{365} \right) \times K_{\text{обор}} \times H_a,$$

где $T_{\text{исп.обор}}$ – время использования оборудование;

365 дней – количество дней в году;

$K_{\text{обор}}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{\text{с.с. обор.}}},$$

где $T_{\text{с.с. обор.}}$ – срок службы оборудования

$$I_{\text{ам.комп}} = \left(\frac{T_{\text{исп.комп}}}{365} \right) \cdot K_{\text{комп}} \cdot H_a = \left(\frac{120}{365} \right) \cdot 20000 \cdot \frac{1}{15} = 438,35$$

Так как для исследования нужен только компьютер, то $I_{\text{ам.комп}} = I_{\text{ам.обор}}$

Расчет заработной платы – заработная плата рассчитывается в соответствии с занятостью исполнителей, с учетом районного и тарифного коэффициентов исполнителей.

В состав затрат на оплату труда включаются:

- выплаты заработной платы за фактически выполненную работу;
- выплаты стимулирующего характера по системным положениям;
- выплаты по районным коэффициентам;
- компенсации за неиспользованный отпуск;
- другие виды выплат. [11]

Примем, что полный фонд заработной платы ($\Phi_{\text{зп}}$):

$$\Phi_{\text{зп}} = 28000 \text{руб},$$

Отчисления на социальные нужды выражаются в виде единого социального налога, который включает в себя: обязательные отчисления по установленным законодательством нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования.

Рассчитываем отчисления на страховые взносы ($I_{\text{стр.взн.}}$):

$$\begin{aligned} I_{\text{стр.взн}} &= I_{\text{п.стр}} + I_{\text{мед.стр}} + I_{\text{б.стр}} = 0,22 \cdot \Phi_{\text{зп}} + 0,051 \cdot \Phi_{\text{зп}} + 0,029 \cdot \Phi_{\text{зп}} = \\ &= (0,22 + 0,051 + 0,029) \cdot 28000 = 8400 \text{руб}, \end{aligned}$$

Где $I_{n.ctr}$ - отчисления на пенсионное страхование от суммы, выплаченной работникам, $I_{med.ctr}$ - на медицинское страхование и $I_{б.ctr}$ - на соцстрахование, за счет которого в дальнейшем оплачиваются больничные и отпуска по беременности и родам.

Накладные расходы используют на следующее:

- 1) затраты на текущий ремонт;
- 2) амортизацию основных производственных фондов;
- 3) затраты на охрану труда и пожарную безопасность.

Для проектных отделов накладные затраты составляют 200% от полного фонда заработной платы Тогда:

$$I_{накл.расх.} = 2 \cdot \Phi_{зп} = 2 \cdot 28000 = 56000 \text{ руб.}$$

Прочие затраты – затраты, к которым относятся налоги, сборы, отчисления в специальные внебюджетные фонды, платежи по обязательному страхованию имущества, вознаграждения за изобретение и рационализаторские предложения, за подготовку кадров, оплата услуг связи и т.д. Эти затраты составляют 2% от всех издержек и вычисляются по формуле:

$$I_{прочее} = 0.02 \cdot (I_{ам.обор} + \Phi_{зп} + ECH) = 0.02 \cdot (435,3 + 28000 + 8400) = 736,7$$

Рассчитываем себестоимость проекта ($K_{проекта}$).

$$K_{проекта} = I_{ам.обор} + \Phi_{зп} + I_{прочее} + I_{накл.расх} + I_{соц.отч} = 438,35 + 28000 + 736,7 + 56000 + 8400 = 93575,05$$

Рассчитываем плановые накопления (ПР). Стоимость проекта включает в себя 30% прибыли, таким образом:

$$ПР = 0.3 \cdot K_{проекта} = 0.3 \cdot 93575,05 = 28072,515$$

Рассчитываем стоимость проекта (Π).

$$\Pi = K_{проекта} + ПР = 93575,05 + 28072,515 = 121647,5$$

Таблица 5.8 - Смета затрат на научно-исследовательскую работу

Виды затрат	Обозначение	Сумма затрат, руб.
Амортизация оборудования	И _{ам,обор}	438,35
Затраты на оплату труда	ЗП	28000
Отчисления на социальные нужды	И _{соц.отч}	8400
Накладные расходы	И _{накл.расх}	56000
Прочие затраты	И _{прочие}	736,6
Себестоимость проекта	К _{проекта}	93575,5
Плановые накопления (прибыль)	ПР	28072,5
Стоимость проекта (цена)	Ц	121647,5

Исходя из расчетов и полученных результатов, приведенных в таблице 4, можно сделать вывод, что данная научно исследовательская работа входит в обозначенные бюджетные ограничения, так как стоимость проекта равная 121647,5 рублей, меньше приблизительной суммы затрат равной 200 тысяч рублей.

5.4 Оценка целесообразности исследования

5.4.1 Оценка научно-технического уровня исследования

Для определения научно - технического уровня проекта, его научной ценности, технической значимости и эффективности необходимо, рассчитать коэффициент научно-технического уровня (НТУ).

Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок. Суть метода состоит в присвоении каждому из признаков НТУ определенного числа баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик.

Формула для определения общей оценки:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

Π_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 5.9 - Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0,8
Теоретический уровень	0,6
Возможность реализации	0,3

Таблица 5.10 - Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 5.11- Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Разработка нового метода	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ	8
Разработка численных экспериментов	6
Элементарный анализ результатов исследования	3

Таблица 5.12 - Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	5
Свыше 10 лет	3

Расчет НТУ:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i$$

где $k_1 = 0,8$; $k_2 = 0,6$; $k_3 = 0,3$;

$\Pi_1 = 9$; $\Pi_2 = 6$; $\Pi_3 = 4$;

$$\text{НТУ} = 0,8*9+0,6*6+0,3*4 = 12.$$

По полученным значениям коэффициент научно-технического уровня (НТУ) можно сказать о достаточно высоком научно – техническом уровне исследования, его научной ценности, технической значимости и эффективности.

5.4.2 Оценка возможных рисков

Произведем оценку рисков. Определение рисков является одним из важнейших моментов при создании проекта. Учет рисков даст возможность избежать опасные факторы, которые негативно отражаются на внедрении в жизнь проекта.

При оценке важности рисков оценивается вероятность их наступления (P_i). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом (w_i). Важность оценивается по 10- балльной шкале b_i . Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице. Оценка важности рисков приведена в таблицах 5.13-5.17.

Таблица 5.13 – Социальные риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Низкая квалификация персонала	0	2	0,061	0
2	Непросвещенность предприятий о данном методе	25	4	0,168	4,2
3	Несоблюдение техники безопасности	25	6	0,23	6,25
4	Увеличение нагрузки на персонал	0	4	0,168	0
	Сумма		16	0,627	10,45

Таблица 5.14 – Экономические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Инфляция	75	2	0,029	2,175
2	Экономический кризис	25	3	0,049	0,980
3	Непредвиденные расходы в плане работ	25	5	0,126	5,862
4	Сложность выхода на мировой рынок	50	6	0,136	6,8
	Сумма		16	0,34	15,817

Таблица 5.15 – Технологические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Возможность поломки оборудования	25	6	0,24	5,25
2	Низкое качество поставленного оборудования	25	8	0,313	7,0357
	Сумма		14	0,553	12,2857

Таблица 5.16 – Научно-технические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Развитие конкурентных методов	25	5	0,135	3,375
2	Отсутствие результата в установленные сроки	0	6	0,123	0
3	Несвоевременное патентование	0	8	0,176	0
	Сумма		19	0,434	3,375

Таблица 5.17 – Общие риски

№ п/п	Риски	b_i	w_i	$b_i \cdot w_i$
1	Социальные	16	0,627	10,45
2	Экономические	16	0,34	15,817
3	Технологические	14	0,553	12,285
4	Научно-технические	19	0,434	3,375
Итого				41,7

Расчет рисков дает общую оценку в 41,7. Эта цифра говорит, что проект может быть реализован, но скорее всего столкнется с рядом препятствий.

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

1) Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат которого показал большой потенциал применения методики.

2) Определен полный перечень работ, проводимых при компьютерном моделировании. Определена трудоемкость проведения работ. Ожидаемая трудоемкость работ для научного руководителя и студента-исполнителя составила 97 чел-дней. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 120 календарных дней.

3) Суммарный бюджет затрат НИР составил – 121647 рублей.

4) Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков. В результате проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического уровня и приемлемый уровень рисков.

Следует отметить важность для проекта в целом, проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-технического исследования.

6. Социальная ответственность.

Введение

Темой научной исследовательской работы является разработка и исследование асинхронного электропривода основного и прижимного транспортера этикетировочной машины с векторным управлением. В ходе эксплуатации линии по розливу, в которую в том числе входит исследуемый объект, могут возникнуть вредные и опасные факторы, которые будут исследованы в данном разделе. Также будут разработаны требования и мероприятия по технике безопасности и проведен анализ пожарной безопасности.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

6.1.1. Специальные трудовые нормы трудового законодательства

Нормы трудового права – это правила трудовых отношений, установленные или санкционированные государством посредством законодательных актов.

Правила носят обязательный и принудительный характер – их нарушение не допускается законом

Нормы трудового права регулируют любые отношения, связанные с использованием личного труда.

При работе на данной электроустановке необходимы мероприятия по компоновке рабочей зоны, от этого зависит безопасность работников. Обязанность по обеспечению безопасных условий и охраны труда возлагается на работодателя.

Так, работодатель обязан обеспечить:

- соответствующие требованиям охраны труда условия труда на каждом рабочем месте;

- режим труда и отдыха работников в соответствии с трудовым законодательством и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права;
- организацию контроля за состоянием условий труда на рабочих местах, а также за правильностью применения работниками средств индивидуальной и коллективной защиты;
- проведение аттестации рабочих мест по условиям труда с последующей сертификацией организации работ по охране труда ГОСТ 21958-76[13], ГОСТ 23000-78[12];
- предоставление федеральным органам исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере труда, федеральным органам исполнительной власти, уполномоченным на проведение государственного надзора и контроля за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права, другим органам исполнительной власти, осуществляющим функции по контролю и надзору в установленной сфере деятельности, органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации в области охраны труда, органам профсоюзного контроля за соблюдением трудового законодательства и иных актов, содержащих нормы трудового права, информации и документов, необходимых для осуществления ими своих полномочий;
- ознакомление работников с требованиями охраны труда;
- разработку и утверждение правил и инструкций по охране труда для работников с учетом мнения выборного органа первичной профсоюзной организации или иного уполномоченного работниками органа в порядке, установленном ст. 372 ТК РФ для принятия локальных нормативных актов.

6.2 Производственная безопасность

6.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

В данном пункте будут проанализированы вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований, при разработке или эксплуатации проектируемого решения. В таблице 6.1 представлены вредные и опасные факторы, этапы работ, на которых эти факторы могут проявиться и нормативные документы, относящиеся к этим факторам.

Таблица 6.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96[15] СанПиН 2.2.4.3359-16[16] СП 52.13330.2016 [17] ГОСТ 12.1.012–2004 ССБТ [18] ГОСТ 12.1.038-82[19] ГОСТ 12.1.003–2014. ССБТ [20]
2. Превышение уровня шума		+	+	
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4.Присутствие вибрации			+	
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	

Неблагоприятные условия окружающей среды вредно воздействуют на организм работающего, снижают реакцию, повышают утомляемость. К этим условиям можно отнести: отклонение показателей микроклимата.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура воздуха в помещении, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха. Эти

параметры в комплексе и по отдельности влияют на организм человека. В цехе во все периоды года поддерживается одна температура и относительная влажность (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Период года	Категория работ	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		Опт.	Доп.	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.
Теплый	Легкая, 1Б	22 - 24	20-28	60-40	15-75	0,1	0,1-0,3
Холодный, переходный,	Легкая, 1Б	21 - 23	19-24	60-40	15-75	0,1	0,1-0,2

Для поддержания в рабочем помещении в холодное время года температуры воздуха 22 – 24°С используют систему отопления на трубчатых, самоварных регистрах и установлены кондиционеры. [15]

При работе конвейерной линии нормы шума колеблются в радиусе 80 – 85 дБА. Уровень шума выше этих значений представляет риск для здоровья. Для снижения рисков от воздействия шума необходимо принимать ряд мер. Необходимые условия для снижения шума:

- Все оборудование, применяемое на участке, для снижения шума установлено на звукопоглощающих опорах.
- На данном участке, при выполнении мероприятий по сокращению проникновения шумов на улицу, световые проемы целесообразно закладывать стеклоблоками.

Безопасность на производстве в значительной мере зависит от освещения. Основная задача освещения на производстве – создание наилучших условий для зрения трудящихся. Эту задачу можно решить только осветительной системой, которая должна соответствовать требованиям [17]. Освещённость на рабочем месте должна соответствовать характеру зрительной работы. В данном случае работы относятся к разряду IV Г. Требуемая норма освещения $E_{НОР}=250$ ЛК. Для создания $E_{НОР}$

применяется совмещенное освещение: естественное и общее люминесцентное освещение.

- Для создания рациональных условий освещения важное значение имеет тщательный и регулярный уход за установками естественного и искусственного освещения. Необходимо следить за исправностью схем включения, регулярно заменять перегоревшие лампы. На предприятиях должно быть специально выделенное лицо, заведующее эксплуатацией освещения.

Вредным производственным фактором также является вибрация – механические колебания твердых тел, передаваемые организму человека. Они могут быть причиной расстройства сердечно-сосудистой и нервной системы, а также опорно-двигательной системы человека. Измерение вибрации производится прибором ВШВ–003–М2, снабженным датчиком вибрации, уровень вибрации, (согласно [18]) до 90 Дб. Нормативным документом, рассматривающим уровни шума для различных категорий рабочих мест, служебных помещений является ГОСТ 12.1.003–2014. ССБТ [20]. Гигиенические нормы вибрации, воздействующей на человека на постоянном рабочем месте в цехе сведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3 – Гигиенические нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная вибростойкость (числитель), м/с*10 ⁻² , не более, и логарифмический уровень вибростойкости (знаменатель), дБ, в октановых полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц.					
	2	4	8	16	31,5	63
Общая технология	<u>1,3</u>	<u>0,45</u>	<u>0,22</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
	108	99	93	92	92	92

В качестве защиты от вибрационного воздействия могут применяться следующие методы и средства: применение дистанционного управления с

целью устранения контакта с вибрирующими поверхностями, применение виброгасителей, использование средств индивидуальной защиты.

Данное помещение, согласно ПУЭ, относится к категории низкой опасности поражения электрическим током.

К работе на линии допускаются лица, хорошо изучившие правила обслуживания и управления линией и прошедшие инструктаж по соблюдению правил техники безопасности.

К работам по наладке электропривода допускаются не менее двух человек по письменному разрешению руководителя.

При настройке схем, замене предохранителей и т.д. необходимо использовать приборы и средства защиты, предназначенные для работ на электроустановках до 1000 В. Средства защиты, к которым относятся резиновые галоши, коврики, изоляция инструмента и т.д., должны проверяться перед каждым использованием. При наладке привода необходимо применение запрещающих и предупреждающих плакатов. Испытание электропривода осуществляется сначала на холостом ходу затем под нагрузкой.

Для безопасной работы механической части электропривода необходимо иметь ограждения, обладающие соответствующей прочностью. Во время работы линии не допускается брать пучок жил в руки вблизи работающих органов линии.

Все токопроводящие части электропривода, проводка должны быть ограждены и не доступны для случайного прикосновения. С этой целью электропривод размещается в корпусе, защищенном от доступа. Часть проводки в рабочей зоне линии заключается в металлорукав или в специальные защитные щитки. Все металлические части, которые могут оказаться под напряжением, должны быть заземлены. Электропривод должен быть обеспечен аварийным выключателем для полного снятия напряжения с электродвигателя, проводки и приборов.

Таблица 6.4 – Допустимые значения токов и напряжений прикосновения

Род тока	U, В	I, mA
переменный, $f=50$ Гц	2	0.3
постоянный	8	1

Предельно допустимые значения токов и напряжений прикосновения в аварийном режиме до 1000 В с глухо–заземленной нейтралью, согласно [19], представлены в табл. 6.5. Превышение этих значений достигается путем правильной эксплуатации оборудования и приборов.

Таблица 6.5– Предельные значения токов и напряжений прикосновения

Род тока		0,1 с	0,3 с	0,5 с	1 с
постоянный	U, I	500	350	250	200
выпрямленный, двух полупериодный	U, I	500	300	230	180
переменный $f=50$ Гц	U, В I, mA	340 400	135 160	100 125	60 50

6.2.2 Расчёт заземления

Данные для расчёта заземления:

1. Заземление необходимо выполнить для установки, работающей под напряжением 380 В.
2. Для заземления используем трубы диаметром 4 мм и длиной 2,5 м и сталь полосовую 18x4 мм.
3. Заземлители расположены в ряд.
4. Характер грунта в месте установки заземления – глина. Заземлители установлены на глубину (от верхнего конца трубы) 17 см, а расстояние между трубами принимаем равной трём длинам заземлителей, т.е. $a=7,5$ м.

Верхние концы соединены с помощью полосовой стали. Согласно [21] определим, что для данного случая по нормам допускается сопротивление не более 4 Ом. Удельное сопротивление глины составляет $\rho_{\Gamma} = 0,6 \cdot 10^4$ Ом·см.

Учитывая применение грунта зимой и просыхания его летом, определяем расчётные значения ρ_{ε} и ρ_n при использовании трубчатых заземлителей соединительной полосы и соединительной полосы:

$$\rho_{\varepsilon} = \rho_{\Gamma} \cdot \kappa_{\varepsilon} = 0,6 \cdot 10^4 \cdot 1,9 = 1,14 \cdot 10^4 \text{ (Ом·см)},$$

где $\kappa_{\varepsilon} = 1,9$ – коэффициент для вертикальных электродов;

$$\rho_n = \rho_{\Gamma} \cdot \kappa_n = 0,6 \cdot 10^4 \cdot 5 = 3 \cdot 10^4 \text{ (Ом·см)},$$

где $\kappa_n = 5$ – коэффициент для горизонтальных электродов.

Определим величину сопротивлений одной забитой в землю трубы по выражению:

$$R_{\varepsilon} = \frac{\rho_{\varepsilon}}{2 \cdot \pi \cdot l_m} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_m}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot h_m + l_m}{4 \cdot h_m \cdot l_m} \right),$$

где h_m – глубина заземления, $h_m = 180$ см;

l_m – длина заземления, $l_m = 250$ см;

d – диаметр заземления, $d = 0,4$ см.

$$R_{\varepsilon} = \frac{1,14 \cdot 10^4}{6,28 \cdot 250} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 250}{0,4} + 0,5 \cdot \ln \frac{750 + 250}{750 \cdot 250} \right) = 54,4 \text{ Ом.}$$

Определим число заземлителей:

$$n = \frac{R_{\varepsilon}}{z} = \frac{54,4}{4} = 14 \text{ шт.}$$

Учитывая, что трубы соединены заземлительной полосой, которая выполняет роль заземлителя, уменьшаем число труб до 11 штук. Определим длину соединительной полосы:

$$l_m = 1,05 \cdot a \cdot (n-1) = 1,05 \cdot 7,5 \cdot (11-1) = 78,75 \text{ м,}$$

где n – число заземлителей;

a – расстояние между заземлителями.

Размер помещения 40х120 м, длина соединительной полосы вписывается в его размер.

Резльтирующее сопротивление (полосы и трубы) с учётом коэффициента использования труб $J_{\text{э}}=0,85$ и полосы $J_{\text{п}}=0,86$ определяется по формуле:

$$R_c = \frac{R_{\text{э}} \cdot R_{\text{п}}}{R_{\text{э}} \cdot J_{\text{п}} + R_{\text{п}} \cdot J_{\text{э}} \cdot n} = \frac{54,4 \cdot 7,26}{54,4 \cdot 0,86 + 7,26 \cdot 0,85 \cdot 11} = 3,42 \text{ Ом.}$$

Данная величина удовлетворяет требованиям защитного заземления. Контроль заземления производится при приёме в эксплуатацию, а также периодически, в сроки, установленные правилами, при перекомпоновке оборудования и ремонте заземлителей.

Схема расположения устройства защитного заземления по отношению к зданию показана на рисунке 6.

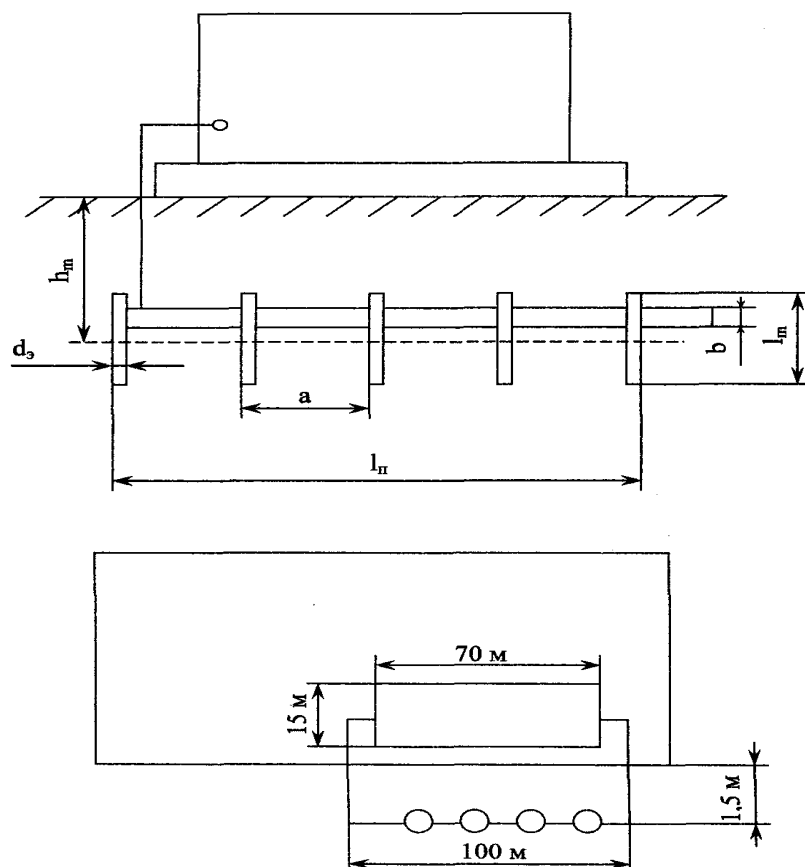


Рисунок 6.1 – Схема защитного заземления

В данном случае выполняем выносное заземление. Заземлители располагаются на некотором удалении от здания. Поэтому заземление корпуса находится вне поля растекания и человек, касаясь корпуса, оказывается под полным напряжением относительно земли. Выносное заземление защищает за счёт малого сопротивления заземлителей.

6.3 Экологическая безопасность

Проблема защиты окружающей среды – одна из важнейших задач современности. Выбросы промышленных предприятий в атмосферу, водоёмы и недра на современном этапе развития достигли таких размеров, что в ряде районов земного шара, особенно в крупных промышленных центрах, уровень загрязнений существенно превышает допустимые санитарные нормы.

Обмен веществ и энергии производства с окружающей средой представлен на рисунке 7.

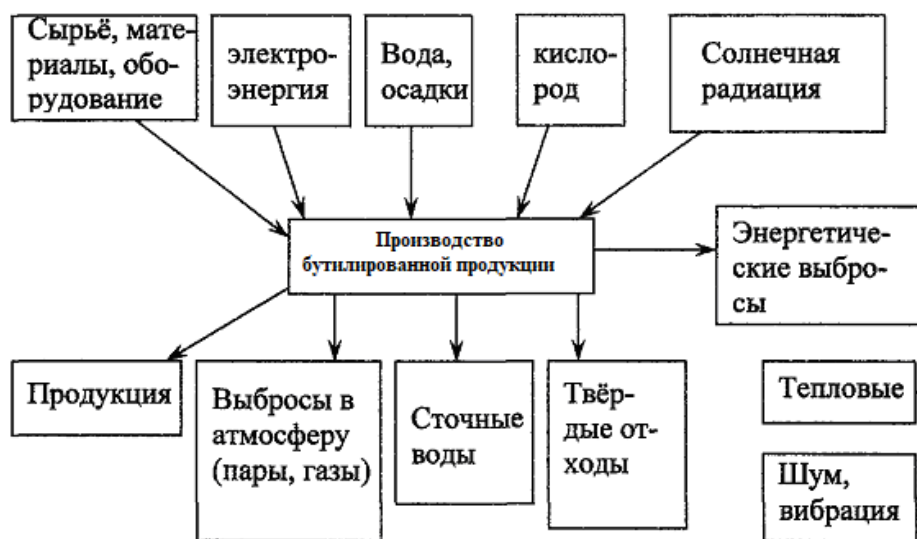


Рисунок 6.2– Обмен веществ и энергии при производстве бутилированного продукта

В соответствии с требованиями [22], для каждого источника загрязнения атмосферы устанавливается предельно допустимый выброс

вредных веществ из условия, что выбросы вредных веществ от данного и совокупности источников города или другого населённого пункта, с учётом перспективы развития промышленных предприятий и рассеивания вредных веществ в атмосфере, не создадут приземную концентрацию, превышающую ПДК для населения, растительного и животного мира.

Радикальное решение проблем охраны окружающей среды от негативных воздействий промышленных предприятий возможно при широком применении безотходных и мало отходных технологий. Использование очистных устройств, сооружений позволяет локализовать выброс, а применение более современных систем очистки всегда сопровождается экспоненциальным ростом затрат на осуществление процесса очистки, даже в тех случаях, когда это технически возможно.

Под понятием “безотходная технология” следует понимать комплекс мероприятий в технологических процессах, от обработки сырья до использования готовой продукции, в результате чего сокращается до минимума количество вредных выбросов и уменьшается воздействие отходов на окружающую среду до приемлемого уровня.

В этот комплекс мероприятий входят:

- создание и внедрение новых процессов получения продукции образованием наименьшего количества отходов;
- разработка систем переработки отходов производства во вторичные материальные ресурсы;
- разработка различных типов бессточных технологических систем и водооборотных систем на базе способов очистки сточных вод;
- создание территориально – промышленных потоков сырья и отходов внутри комплекса.

Вода на производстве может быть использована для вспомогательных целей: охлаждение (подогрев) исходных материалов и продукции предприятия, охлаждение деталей и узлов технологического оборудования, промывки и очистки продукции, что приводит к загрязнению воды

растворами и нерастворимыми примесями, поэтому здесь применяется система оборотного водоснабжения.

“Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами” запрещает выбрасывать в водоемы сточные воды, если этого можно избежать, используя более рациональную технологию и системы повторного и оборотного водоснабжения.

При эксплуатации линии выделяется много пыли, масел и эмульсий. Отработанные эмульсии и масла собираются в специальных сборниках, проходят очистку и снова запускаются в технологический процесс. Отходы от этой очистки подлежат уничтожению. В цехе работает принудительная вентиляция, снабженная пылеулавливающими аппаратами типа циклонный пылеуловитель.

Важнейшим звеном в обеспечение качества окружающей среды является система контроля за ее состоянием, включающая:

- наблюдение за состоянием окружающей среды и прогноз измерений;
- выявления и оценку источников загрязнения;
- предупреждение появления повышенных загрязнений.

Контроль выбросов промышленных предприятий осуществляется в соответствии с [22]. Систему контроля разрабатывает промышленное предприятие. Контролю подлежат выбросы, поступающие от дымовых труб, вытяжных систем и т.п.

Данные по расходу воды, воздуха на линии:

- номинальный расход сжатого воздуха 25 м³/час;
- расход воды 12 м³/час.

Безопасная технология является наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредных воздействий выбросов промышленных предприятий.

Двигатели, выработавшие свой ресурс, не представляют опасности для здоровья человека и окружающей среды и подлежат утилизации. Материалы двигателя (алюминий, медь, сталь, чугун) перерабатываются для вторичного

использования. Органические и пластмассовые детали двигателя (лак, пластмассовые изделия, резина и др.), утилизируются с соблюдением экологических норм (ГОСТ Р 55102-2012).

6.4 Пожарная безопасность

Пожарная безопасность является одним из важнейших разделов охраны труда на производстве. Существенную роль в профилактике и предотвращении пожаров играет правильный выбор режима работы электрооборудования с учётом класса по пожароопасности, применения молниеотводов. Все производственные помещения по пожароопасности разделяются на пять основных категорий. В процессе получения изделия на линии видимые признаки, обуславливающие возникновения пожара, отсутствуют и, следовательно, данное производство согласно федеральному закону от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ можно отнести к категории Д (производство, в котором негорючие вещества и материалы находящиеся в холодном состоянии). Однако, в данном технологическом процессе пожар может возникнуть из-за таков короткого замыкания, вызывающих высокую температуру нагревания проводников, что приводит к их выплавлению из изоляционного материала. В этом отношении опасны недопустимые электрические перегрузки проводов и обмоток электрических машин. В местах плохого контакта соединения проводников вследствие большого переходного сопротивления выделяется большое количество тепла. Это приводит к повышению температуры и воспламенения изоляции. Были установлены общие требования пожарной безопасности к объектам различного назначения всех отраслей народного хозяйства при строительстве и эксплуатации. Пожарная безопасность должна обеспечиваться:

- системой предотвращения пожара;
- системой противопожарной защиты;
- организационно–техническими мероприятиями.

Автоматические установки пожаротушения и установки пожарной сигнализации, введенные в объект, должны удовлетворять требованиям проектной документации и отраслевым стандартам.

Огнетушители различных видов относятся к классу переносных средств пожаротушения. Огнетушители, годные к эксплуатации, должны иметь бирку и маркировку и должны быть окрашены в красный цвет. Зарядка и перезарядка всех типов огнетушителей должна выполняться в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Огнетушители должны располагаться в заметных и легко доступных местах, где исключено попадание солнечных лучей.

Таблица 6.6 – Количество первичных средств пожаротушения

Цех	S _{цеха} , м ²	Огнетушители		Ящик с песком, м ²
		ОУ-5	ОХП-10	
Линия по разливу	300	1	2	1

Пожарный ручной инструмент и инвентарь, размещенный на объекте, подлежит периодическому обслуживанию, включающему следующее:

1. Очистка от пыли, грязи и коррозии;
2. Восстановление соответствующей окраски.

Ящики с песком должны быть укомплектованы лопатой и иметь вместимость до 3 м³.

На рабочем месте каждый станок должен быть оснащен защищенной аппаратурой. Должна быть предусмотрена блокировка и защита на случай короткого замыкания и перегрузок, обеспечения возможности снятия напряжения всего оборудования с помощью расположенных вне помещения рубильников. Для курения должны быть отведены специальные места. В производственных помещениях должна обеспечиваться возможность эвакуации людей и оборудования в случае пожара. План эвакуации на случай пожара представлен на рисунке 6.3.

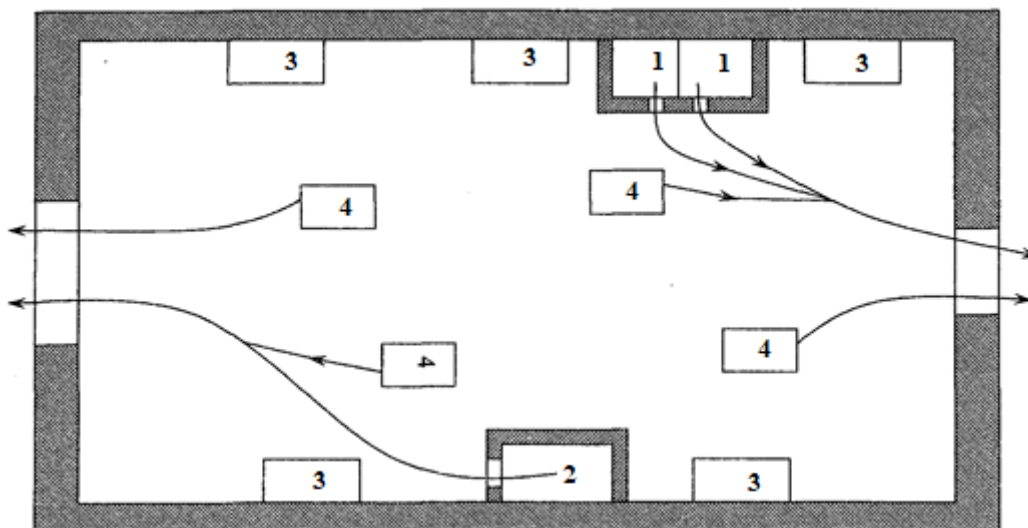


Рисунок 6.3 – План эвакуации на случай пожара: 1 – руководство цеха; 2 – ОТК; 3 – первичные средства пожаротушения; 4 – рабочие места.

Вывод:

В данном разделе были освещены правовые и организационные вопросы, выявлены и проанализированы опасные и вредные производственные факторы, даны практические рекомендации по технике безопасности и производственной санитарии. Также был проработан один из важнейших разделов охраны труда на производстве – пожарная безопасность. Среди прочего было определено количество первичных средств пожаротушения и разработан план эвакуации на случай пожара

Заключение

В данной работе был разработан и исследован асинхронный частотно-регулируемый электропривод транспортера этикетировочной машины.

В работе осуществляется выбор оборудования. Предложено использовать для основного и прижимного транспортёров современный асинхронный частотно-регулируемый электропривод. Выбраны электродвигатели, преобразователи частоты фирмы LENZE. Требуемый диапазон регулирования является относительно небольшим, однако, решение поставленной задачи синхронизации может быть достигнуто при наличие качественного электропривода. Поэтому выбраны преобразователи, позволяющие реализовать частотно-токовое векторное регулирование с обратной связью по скорости.

Разработана функциональная схема системы автоматического регулирования электроприводами ориентаторов, верхнего и основного транспортёров.

Показано, что для реализации поставленной задачи синхронного движения электроприводов верхнего и нижнего транспортёров необходимо обеспечить синхронизацию не только скоростей, но и положений механизмов.

Электроприводы конвейеров рассмотрены как следящие системы, замкнутые по положению, управление которыми осуществляется в режиме равномерной заводки.

Разработана структурная схема асинхронного частотно-токового электропривода с векторным управлением. Выполнена оптимизация контуров регулирования: тока, потокосцепления, скорости и положения. Определены показатели качества регулирования. Проведены имитационные исследования в программной среде Matlab Simulink совместной работы электроприводов нижнего и верхнего транспортёров.

Показано, что разработанный электропривод полностью удовлетворяет требованиям технического задания, а предложенные принципы организации управления позволяют обеспечить синхронное движение механизмов.

В экономической части рассчитаны затраты на разработку и исследование электропривода.

В разделе безопасности и экологичности проанализированы опасные и вредные производственные факторы, даны практические рекомендации по технике безопасности и производственной санитарии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эtiquетировочный аппарат ПАККА-3000ЭУ. Техническая документация.
2. И.И. Алиев. Электротехнический справочник - Москва – 2000г.
3. Проектирование ленточного конвейера. Методические указания. / А.В. Тарнопольский, Н.Е. Курносов, Л.П. Корнилаева, Ю.К. Измайлов – Пенза: ПензГУ, 2009. – 60 с.
4. Чернышев А. Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие для академического бакалавриата / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – Москва: Издательство Юрайт, 2018. — 215 с.
5. Онищенко Г.Б. Рег. Автоматизированный электропривод промышленных установок: Уч. пособие для ВУЗов, М.: Энергоатомиздат, 2002 г.
6. Преобразователь частоты Lenze V9300 vector. Технические характеристики.
7. Л.С. Удуг, Н.В. Кояин, О.П. Мальцева. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов Часть 6 Издательство ТПУ - Томск – 2005г.
8. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.
9. А.И. Балашов, Е.М. Рогова., и др. Управление проектами. Учебник для бакалавров. «Юрайт». Москва 2013. – 383 с.
10. Ф.Н. Филина. И.А. Толмачёв. Всё об индивидуальном предпринимателе: [справочник]. - (3-е изд., перераб. и доп.). «Российский Бухгалтер» Москва 2009. - 504 с.
11. Н.Г. Алпатова., Н.Ю. Шорникова. Аудит расчетов по оплате труда: учебное пособие. «Юнити-Дана». Москва 2012. – 87 с.
12. ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования.

13. ГОСТ 21958-76. Система «человек-машина». Зал и кабины операторов. Взаимное расположение рабочих мест. Общие эргономические требования.
14. Трудовой кодекс российской федерации.
15. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
16. СанПиН 2.2.4.3359-16. "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах"
17. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
18. ГОСТ 12.1.012–2004. ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.
19. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
20. ГОСТ 12.1.003–2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
21. ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
22. ГОСТ 17.2.3.02–2014. Правила установления допустимых выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями.
23. ГОСТ Р 55102-2012. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководство по безопасному сбору, хранению, транспортированию и разборке отработавшего электротехнического и электронного оборудования, за исключением ртутьсодержащих устройств и приборов.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Касымов Т. Ш., Чернышев А. Ю. Асинхронный электропривод транспортера этикетировочной машины с частотным регулированием // Энергетика и энергосбережение : теория и практика: сборник материалов IV Всероссийской научно- практической конференции, Кемерово, 19-21 Декабря 2018. - Кемерово: КузГТУ, 2018 - С. 1-6

Приложение А

Раздел 2

Asynchronous Electric Drive of the Labeling Machine

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Касымов Тохир Шавкатович		

Консультант школы ИШЭ отделения (НОЦ) ОЭЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	К.Т.Н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) ОИЯ школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Обсков Александр Владимирович	К.П.Н.		

Abstract

The master's thesis contains 109 pages of printed text, 45 figures, 35 tables, and 23 sources.

Keywords: labeling machine, induction variable frequency drive, frequency converter, automatic control system, static and dynamic characteristics, indicators of quality control.

The object of research is the system of automatic control of the labeling machine. The purpose of the work is to develop and study electric drives of the main and top conveyors.

In the master's thesis work the calculation and selection of the drive motor of the frequency converter and the controller for control of electric drives is made. The choice of control method is justified, mechanical and electromechanical characteristics are calculated. Optimization of the control loops is performed and parameters of regulators adjustment are determined. Transient processes in the main modes of operation are studied by the method of simulation modeling on a computer. The method of synchronization of speeds and positions of mechanisms is offered.

The economics section calculates the cost estimate for commissioning works on the installation of new electric drives of the labeling machine.

In the section production and environmental safety, the impact of hazardous and harmful production factors on a person during the operation of the developed electric drive is considered.

The work was done in software environments: Microsoft Word, Matlab Simulink, MathCAD, Microsoft Paint, Microsoft PowerPoint, and Microsoft Visio.

Introduction

The development of high-performance, compact and economical drive systems is a priority area for the development of modern technology. The growing integration in microprocessor technology and the transition from microprocessors to microcontrollers with a built-in set of specialized peripheral devices have made the trend of mass replacement of analog drive control systems with direct digital control systems irreversible.

Product analysis of the world's leading manufacturers of drive systems and materials of published scientific researches in this area allows noting the following pronounced tendencies of development of the electric drive: the share of drive systems with DC motors steadily decreases and the share of drive systems with AC motors increases. It is connected with the low reliability of mechanical collector and higher cost of DC collector motors in comparison with AC motors. Due to the sharp reduction in the cost of static frequency converters, the share of frequency-controlled asynchronous electric drives is increasing rapidly. Promising control systems of electric drives are developed with an orientation to complex automation of technological processes and coordinated operation of several drives in the industrial network.

The task of synchronization speeds and positions of mechanisms participating in the technological process is relevant for many industries, such as mechanical engineering, metalworking, textile, food, and others. The coordinated control allows to integrate separate electric drives into the general control system of technological process, to provide the necessary quality of production and to exclude equipment downtimes. The purpose of the master's thesis is to develop and research electric drives for the conveyors of the labeling machine of the bottled production line.

Process description

There are a few different types of conveyors that we can choose from for our packaging line. Standard conveyors are what you most likely think of when the word pops into our head, and these variable-speed machines are designed around bottling machine requirements. Rotary turntables are also available and are designed for improving efficiency during the bottling process. They can be customized for specific needs, including adding bottle guides, railing, and half-moon off-loading options. Finally, there are cooling conveyors for molten products. Cooling conveyors are engineered to transport molten liquid products slowly and smoothly during the filling and cooling process to prevent spillage and waste and can be customizable to have fans implemented underneath the belt for when additional cooling is required. Often, production managers are being challenged to reduce energy costs, water usage and downtime while enabling greater efficiency. In many cases, the conveyor systems that could contribute to those efforts rely on outdated technologies that limit the improvements that can be achieved. Fortunately, new technologies have emerged that are designed to reduce water usage, increase energy efficiency and minimize downtime in high-speed food and beverage production environments. All achievable by examining the total concept which consists of five key factors, cleaning, process, mechanical components, product, and the human factor. In this case, the production is a conveyor line for the production of bottled products. Each element of a conveyor line represents the complicated multi-motor unit.

Technological process

A simplified process flowchart is shown in figure 1.1.

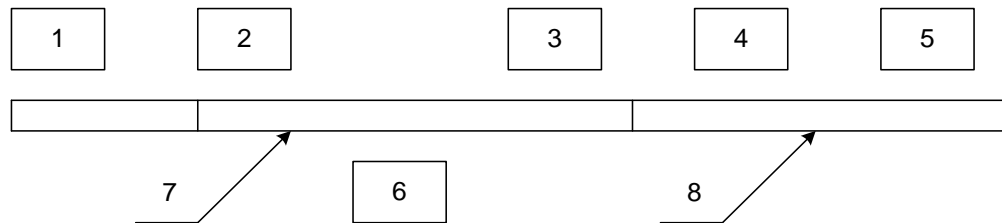


Figure 1.1 - Process flow chart

Accepted designations:

1-Elevator

2-Rinse device

3 Monoblock (capping spill)

4 Machine for visual inspection of liquids

5-labeling machine

6-Filter

7-8 Transporter (conveyor belt)

On elevator 1, an empty bottle, which has been cleaned for the first time, is lifted into rinse aid 2 and then finally cleaned, being under the pressure of cleaning mixture for a certain time. The cleaned bottles get into monoblock 3, where they are filled with product and sealed with a lid, and then they get into the machine of visual inspection of liquid 4, where the control of foreign particles is carried out. Closed containers are sent to the labeling machine 5, where they are labeled and counter-labeled. The purity of the product depends on filter 6.

Description of the labeling machine

Labeling machines are machines that dispense, apply or print-and-apply labels to various items, products, containers, or packages. The types of labeling systems will be considered below. Types of Labeling Systems: There are several types of labelers available for production lines based on their specific needs. Horizontal wrap labelers: These are typically utilized for labeling unstable round containers such as vials with rounded bottoms. Items are placed on a horizontal roller, which then runs them through a wrap station. Vertical wrap labelers: Vertical labelers are normally used for a variety of bottles, including slightly tapered bottles and stable square or rectangular bottles that won't easily trip during transfers. Partial and full labels are available for these labeling machines. It's among the most popular options. Front and back labelers: Use these labelers to place labels on one or two sides, or in some cases with some modification, three sides of either oval, flat, round, or rectangular bottles. However, like vertical wrap labelers, bottles need to be stable enough to avoid tripping while being transported on conveyors. Top labelers: This type of labeler is suitable for a variety of applications, including everything from electronics to edibles. It works by placing a panel or spot label on the top of a product that passes, such as a wide round jar lid. Top and bottom labelers: These are used to label flat containers that require both a top and bottom labels, such as a tray with a UPC label on the bottom and a product label on the top.

The appearance of the labeling machine under study is shown in Figure 1.2

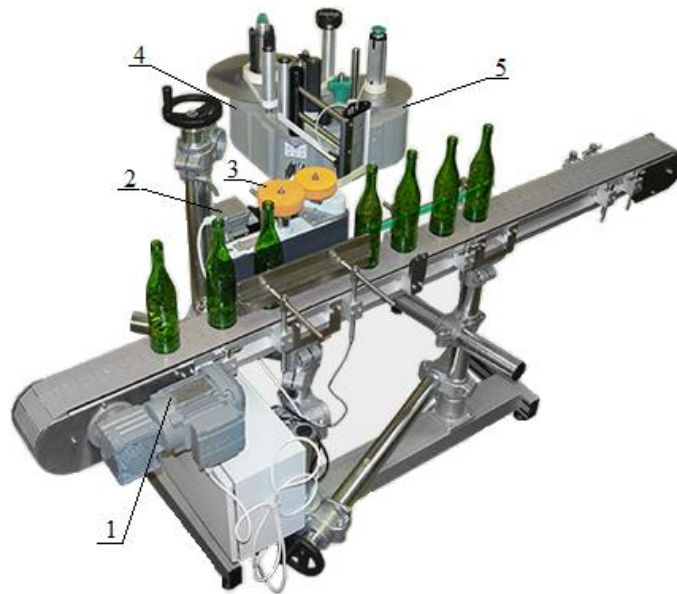


Figure 1.2

The composition of the labeling machine includes 5 electric drives: electric drive of the main conveyor - 1, electric drive of the pressure (upper) conveyor - 2, electric drive of the orientation (direction control unit) (side rollers) - 3, two electric drives of label feeding (labels and back labels) - 4 and 5.

The basic scheme of the labeling device is shown in Figure 1.3

The applicator is available in right-hand and left-hand versions, which is related to the direction of product delivery. The following describes the operation of the right-hand machine. For the left-hand side, all explanations are mirrored.

The label material is unwound from roller 3. The coil material is held in place by two removable plates. The front removable plate must be pressed against the label reel.

Floating lever 4 controls the unwinding braking. This device prevents uncontrolled inertial movement of the label material. The brake must not be tightened too much, otherwise, the motor may stop or the material roll may break.

Lever 11 keeps the material tensioned and reduces acceleration. The guide roller 8 ensures the correct running of the material. The material is guided to the separating edge through the guide roller 9. Brush 6 keeps the material tensioned

without disrupting movement. Label sensor 15 is located at separating edge 10. The label sensor detects the intervals between the labels. The label sensor has a light source and receiver. Sensitivity can be adjusted via the control panel. On the edge of compartment 10, the label is separated from the paper backing. The label is applied to the product using roller 16. Rollers 5 ensure the correct passage of the material around the separating edge. Leading roller 1 maintains the material transport speed according to the setting.

The clamping roller 12 must be set up in the middle of the belt to ensure that the material is run safely. The required position can be adjusted using screws.

The handle can be used to open and close the mechanical hold-down of the pressure roller 12. When filling the material, the pressure roller must be open

Separation is only possible when the pressure knob is in the closed position. The paper of the substrate is transmitted through the guide roller to the winding core 13. A cone between the four needles can be extended to allow the backing paper to be filled.

Except for drive roller 1 and brush 6, the applicator has no wearing parts.

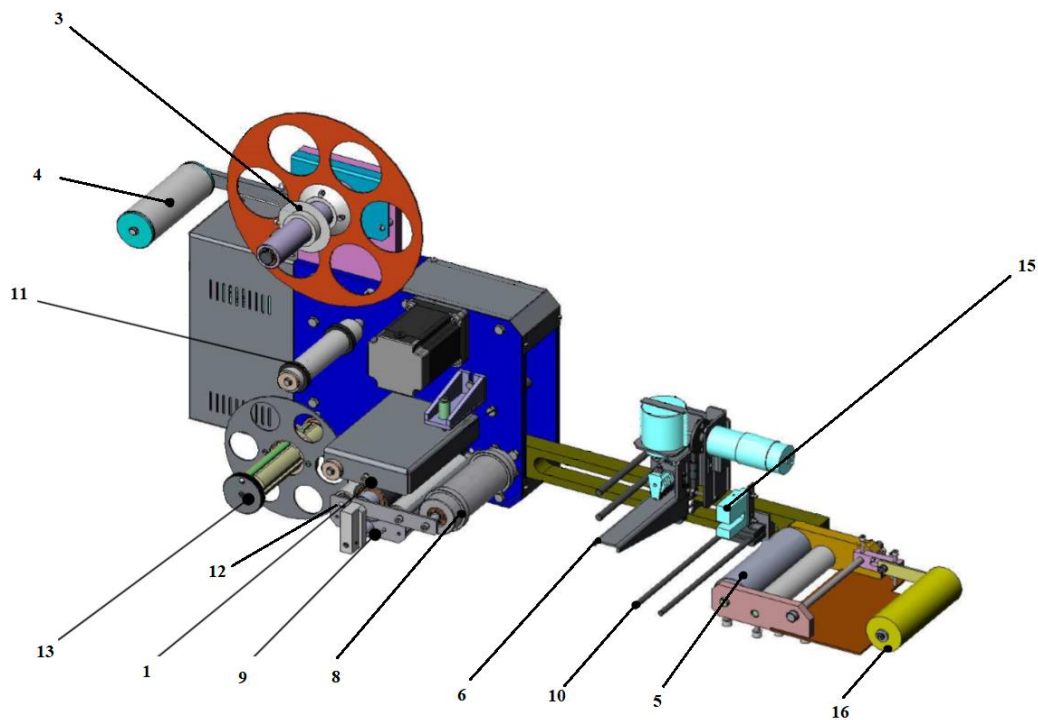


Figure 1.3 – Labelling machine schematic diagram

Kinematic scheme of electric drive

The kinematic schemes of electric drives of the main and pressed conveyors are presented in Fig. 1.4.

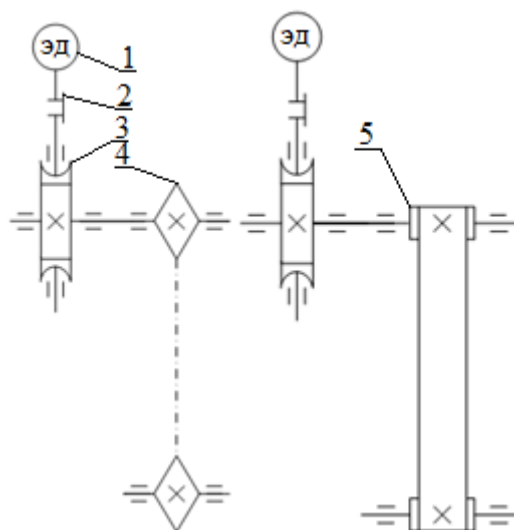


Figure. 1.4. The kinematics of the main conveyor and the top conveyor

The kinematic schemes of the main conveyor and the pressure (top) conveyor have an electric motor - 1, a clutch - 2, a worm gearbox - 3 and a chain gear - 4 or a belt gear - 5 transfers.

Selection of electrical equipment and calculation of parameters

The rationale for the use of a variable speed drive

The choice of the electric drive system is one of the important stages of the design process, as it will determine the technical and economic success. Therefore, it is necessary to analyze the various drive systems and to select the one that will better meet the technological and economic requirements for the drive. The operating mode is continuous (S1) and does not provide for frequent starts and stops. The load is constant; the static moment is independent of the speed. It seems perspective to use induction electric drives with frequency control, which meet the technical requirements and conditions of the task in terms of functionality and

performance. Induction motors are simple and rugged in construction. Advantage of induction motors is that they are robust and can operate in any environmental condition. Induction motors are cheaper in cost due to the absence of brushes, commutators, and slip rings. They are maintenance free motors unlike dc motors and synchronous motors due to the absence of brushes, commutators, and slip rings. Induction motors can be operated in polluted and explosive environments as they do not have brushes which can cause sparks. 3 phase induction motors will have self-starting torque, unlike synchronous motors, hence no starting methods are employed, unlike synchronous motor. Let's consider economic substantiations for the use of induction drive: Low cost. Asynchronous squirrel-cage machine has a lower cost in relation to the DC machine. This is due to the simpler design and high manufacturing technology. Induction motors are much more common than any other kind of electric machines. Low operating costs. The asynchronous squirrel-cage machine requires almost no maintenance during its entire lifetime. While the DC machine requires regular maintenance of the collector unit. Repair of an electric machine. The total cost of organizing and repairing DC motors is often commensurate (and for this application - exceeds) with the cost of a new asynchronous squirrel-cage machine. The level of protection. Induction squirrel-cage machine designs have a wide range of protection degrees. The following advantages of the induction machine do not take into account the fact that the motor will be operated in conjunction with a frequency inverter. When induction motors are powered from frequency inverters, their efficiency is reduced by 2 ... 3% and $\cos\varphi$ by up to 5%. The presence of additional losses in the coils and steel of the magnetic circuit is due to the higher harmonics of current and magnetic flux. Therefore, when using induction drives with frequency control, takes measures to improve the harmonic composition (install additional devices, adjust the parameters of the converter, etc.).

The choice of variable frequency drive for this type of automation objects has a number of features associated with the necessity of coordinated control of several drives. Therefore, despite the fact that the range of speed control is

relatively small, it is necessary to use closed-loop control systems based on the principles of vector control. An important factor in favor of a frequency-controlled drive is the fact that modern frequency converters can be easily integrated into any control system, as a low-level intelligent element of automation, do not require complex matching circuits and have an excellent set of built-in service capabilities (current and speed control of the drive motor, developed protection system, etc.).

Choice of electric motor

AC motors are among the simplest of motors amid the common choices for motion control systems. There are a few basic criteria for selecting an AC motor. These involve common variables such as the operating speed and load torque, in addition to the power supply voltage and frequency. First of all, it is necessary to calculate the operating speed. Induction and reversible motor speeds cannot be adjusted. This is why the motor speed must be reduced with gearheads to match the required machine speed. It's therefore, necessary to determine the correct gear ratio. Next, to need to calculate the required torque. In a single-phase induction motor, starting torque is always lower than the rated torque. Therefore, to drive a frictional load, we need to select the speed on the basis of starting torque. This will cause the actual speed to exceed the rated speed. Also, motors are designed so that increases in motor temperature are at their lowest when operating close to the rated speed of rotation.

Then, knowing the required torque and speed, we can select a motor and a gearhead. Select a motor wattage and gear ratio based on the required torque and speed. Then confirm the permissible inertia. The permissible inertia of the selected motor and gearhead combination should be greater than the load inertia. A conveyor speed of 30 m/min has been selected as required. According to the procedure described in, we determine the static power of the drive to select an electric motor.

$$N_{EM} \geq \frac{K_s \cdot \sum W_i \cdot V_C}{10^3 \cdot \eta_M} = \frac{1,1 \cdot 550 \cdot 0,5}{10^3 \cdot 0,9} = 0,336 \text{ kW} ,$$

где κ_s – Belt and reel grip factor;

$\sum W_i$ – Traction force equal to the total resistance of the belt, N;

V_C – belt speed, m/s;

η_M – gear efficiency.

Static torque applied to the motor shaft:

$$M_{st} = \frac{F \cdot D_r}{2 \cdot 10^3 \cdot U_{dr} \cdot \eta_M} = \frac{750 \cdot 200}{2 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 0,98} = 2,551 \text{ N}$$

где F – belt tension, N;

D_r – drive reel diameter, mm;

U_{dr} – drive ratio;

η_M – drive efficiency.

Determine the drive reel speed:

$$n = \frac{1000 \cdot V_C}{\pi \cdot D_r} = \frac{1000 \cdot 30}{3,14 \cdot 200} = 47,7 \text{ r / min}$$

Taking into account the gear ratio of the motor shaft speed:

$$n_d = n \cdot U_{dr} = 47,7 \cdot 30 = 1431 \text{ r / min}$$

Choose an electric motor for the main conveyor AIR 63V4Y3, whose passport data is given in table 2.1.

Table 2.1 – Motor technical data AIR 63V4Y3

Motor size	Synchronous speed, rpm	the torque of inertia, kg*m ²	Motor power, kW	At nominal load			
				slip	Current, A	efficiency, %	cos φ
AIR 63V4Y3	1500	0,0014	0,37	0,12	2,05	68	0,7

Continuation of table 2.1

$\frac{M_s}{M_{nom}}$	$\frac{M_{max}}{M_{nom}}$	$\frac{M_{min}}{M_{nom}}$	$\frac{I_s}{I_{nom}}$
2,1	2,2	1,6	6,5

In accordance with the method described in [4], the calculated parameters of the T-shaped equivalent circuit were obtained. Parameters of this circuit are presented in Table 2.2

Table 2.2 – Estimated parameters of the T-shaped equivalent circuit

R_1, Ohm	R_2', Ohm	X_{kn}, Ohm	X_{1n}, Ohm	X_{2n}', Ohm	$X_{\mu n}, \text{Ohm}$
30,697	28,612	29,33	12,318	15,855	107,955

Calculation and construction of mechanical and electromechanical characteristics of the electric motor

The mechanical characteristic of an induction motor is defined by the following formula

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1n}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{kn}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu n}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 28,612}{157,1 \cdot s \cdot \left[29,612^2 + \left(30,697 + \frac{28,612}{s} \right)^2 + \left(\frac{30,697 \cdot 28,612}{s \cdot 107,955} \right)^2 \right]}.$$

Mechanical characteristic of the selected motor is shown in Figure 1.5.

The mechanical characteristic (figure 1.5) obtained in the calculations, using the parameters of the T-shaped equivalent circuit, corresponds to an induction motor with an unsaturated magnetic system, and its originality is determined by the dependence of the inductive resistance on the slip.

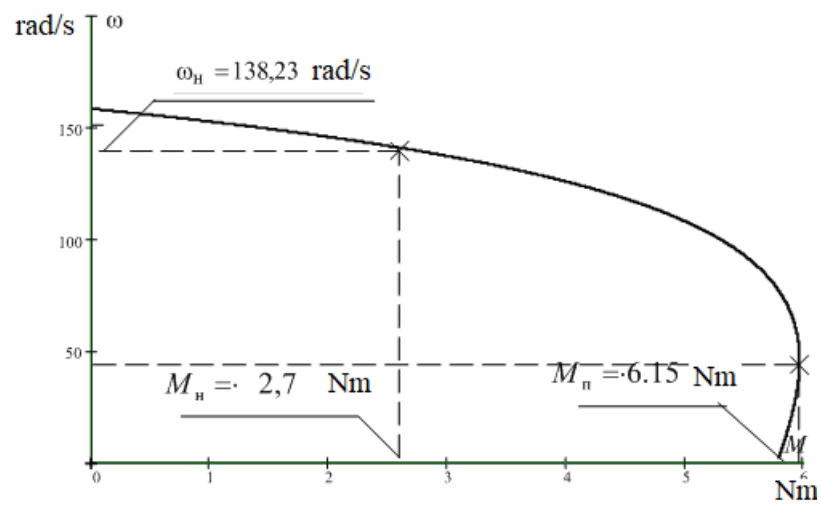


Figure 1.5 – Natural Mechanical Characteristics
induction motor $M = f(\omega)$

An electromechanical characteristic was also constructed:

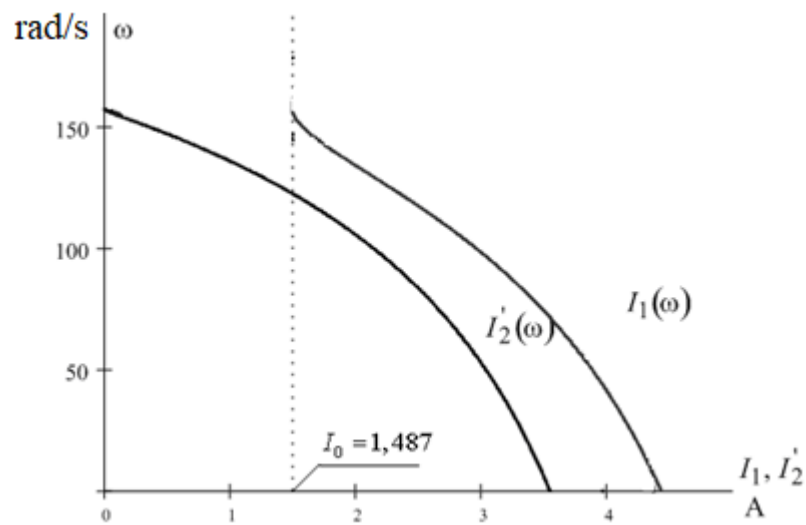


Figure 1.6 – Electromechanical characteristics of
induction motor $I_1 = f(\omega), I_2' = f(\omega)$